



# Prise en compte des perceptions de l'utilisateur en conception de produit. Application aux instruments de musique de type cuivre.

Emilie Poirson

## ► To cite this version:

Emilie Poirson. Prise en compte des perceptions de l'utilisateur en conception de produit. Application aux instruments de musique de type cuivre.. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole Centrale de Nantes (ECN); Université de Nantes, 2005. Français. NNT : . tel-00090058

**HAL Id: tel-00090058**

**<https://theses.hal.science/tel-00090058>**

Submitted on 28 Aug 2006

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

*École Centrale de Nantes*

*Université de Nantes*

**ÉCOLE DOCTORALE**  
**MECANIQUE, THERMIQUE ET GENIE CIVIL**

*Année 2005*

N° B.U.:

**Thèse de Doctorat**  
***Diplôme délivré conjointement par***  
***L'École Centrale de Nantes et l'Université de Nantes***

Spécialité : GÉNIE MÉCANIQUE

Présentée et soutenue publiquement par:

**Emilie POIRSON**

le 8 décembre 2005  
à l'Ecole Centrale de Nantes

**Prise en compte des perceptions de l'utilisateur en  
conception de produit. Application aux instruments de  
musique de type cuivre.**

Présidente :	Catherine Dacremont	<i>Professeur, ENSBANA, Dijon</i>
Rapporteurs :	Améziane Aoussat	<i>Professeur, ENSAM, Paris</i>
	René Caussé	<i>Chargé de Recherches, Thèse d'état, IRCAM, Paris</i>
Examineurs :	Murray Campbell	<i>Professeur, Université d'Edimbourg</i>
	Joël Gilbert	<i>Chargé de Recherches CNRS, HDR, LAUM, Le Mans</i>
	Jean-François Petiot	<i>Maître de conférences, HDR, IRCCyN, Nantes</i>
Invité :	Vincent Roussarie	<i>Ingénieur de recherche, PSA Peugeot Citroën</i>

---

Directeur de thèse: Jean-François Petiot

Laboratoire: Institut de Recherche en Communications et Cybernétique de Nantes

Co-encadrant: Joël Gilbert

Laboratoire: Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine

N° E.D. 0367-213

# Remerciements

Merci à tous.

Si j'ai hésité à ne laisser que cette courte formule, j'opte finalement pour une liste plus personnalisée, au risque d'en oublier certains (puissent-ils m'en excuser....).

Mes premiers remerciements vont à mes deux ex-pères de thèse, Jean-François Petiot, le plus "swingo" du campus et Joël et son esprit de "l'Equipe". Tous deux m'ont donné le goût de la recherche, dans toutes les directions, par ici et surtout par l'art. Merci à eux.

Merci à Améziiane Aoussat et René Caussé d'avoir accepté la tâche de rapporteur, ainsi qu'à Catherine Dacremont celle de présidente, ainsi que Murray Campbell et Vincent Roussarie celle d'examineur lors de ce conversatoire très enrichissant.

Merci à Philippe Courcoux et Christophe Chauvin qui manient les statistiques instrumentalement, ou statistiquement les instruments...en tous cas, artistiquement. Merci pour votre confiance.

Pour m'avoir ouvert les portes de ce laboratoire, je tiens à remercier sincèrement Jean-François Lafay et tout le staff de l'IRCCyN qui, des coulisses, a oeuvré pour le bon déroulement de cette étude (merci Marie-Odile pour ta patience!). Que l'équipe MCM reçoive toute ma reconnaissance pour m'avoir accueillie alors que "manipulateur cuspidal", "Pareto" ou "orthoglide" étaient pour moi des insultes du capitaine Haddock. Merci également aux colloc' du 414 : Jean-Loïc, Yoann, Vincent et également à Veronica (not "lost in translation") et aux membres de l'ITEMM et du LAUM pour leur contribution.

Merci aux 145 paires d'oreilles attentives ayant passé avec soin les différents tests d'écoute. Je tiens à citer les 10 trompettistes venus participer à cette étude "branchée": Sophie, Paul, Lionel, Stéphane, Billy, Jean-Claude, Patrice, Christian, Yannick et Jean-Jacques. Merci pour votre investissement et votre coopération dans cette épreuve musicale inhabituelle.

Je n'oublie pas bien sûr mes compagnons du Resto-IUFM : Myriam, complice des pauses thé (voire des pauses Debo-thé), Matthieu (un peu plus de sauce?), Mathieu et Fred pour les commentaires de lendemain de match de la Juve ou de l'O.M., Greg qui escalade, qui grimpe (mais où s'arrêtera-t-il?) et Mathieu qui, ah tiens, vient tout juste d'arriver... Un clin d'oeil à tous les copains venus à la soutenance et à ceux qui auraient voulu y être...

Je ne saurais oublier ma famille (entre parents-thèse), élément indispensable de mon harmonie. Merci pour votre soutien et votre contribution indéniable à ce travail. Merci particulier à Loïc et à notre piti mangeur de "gato-cola".

# Sommaire

<b>Introduction</b>	<b>3</b>
<b>1 Etat de l'art</b>	<b>7</b>
1.1 Conception de produits . . . . .	8
1.1.1 Place du marketing par rapport à la conception . . . . .	8
1.1.2 Méthodes rationnelles . . . . .	13
1.1.3 Conception centrée utilisateur . . . . .	20
1.1.4 Conclusions . . . . .	27
1.2 Acoustique des cuivres . . . . .	28
1.2.1 Présentation du produit : la trompette . . . . .	28
1.2.2 Impédance d'entrée . . . . .	32
1.2.3 Cuivres en situation de jeu . . . . .	37
1.3 Qualité des instruments de musique et conception . . . . .	43
1.3.1 La relation musicien - facteur . . . . .	44
1.3.2 La relation facteur - physicien . . . . .	45
1.3.3 La relation physicien - musicien . . . . .	46
1.4 Conclusions . . . . .	54
<b>2 Proposition d'une Méthode de Conception Orientée Client</b>	<b>55</b>
2.1 Rappel de la problématique . . . . .	56
2.2 Description des différentes étapes de la méthode . . . . .	57
2.2.1 Définition du besoin et des préférences . . . . .	58
2.2.2 Relation perceptif / objectif . . . . .	63
2.2.3 Définition et validation du cahier des charges . . . . .	66
2.2.4 Optimisation . . . . .	66
2.3 Application à la trompette . . . . .	67
2.3.1 Création de l'espace produit : Génération d'une famille de trompettes	67
2.3.2 Analyse perceptive : les descripteurs sensoriels de la trompette . . .	72
2.3.3 Analyse perceptive : la formation des experts . . . . .	74
2.3.4 Analyse perceptive : la séance d'évaluation . . . . .	89
2.3.5 Analyse objective : les mesures d'impédance . . . . .	98
2.3.6 Corrélations données objectives / données perceptives . . . . .	100
2.3.7 Optimisation . . . . .	103
2.3.8 Validation de la branche idéale . . . . .	111
2.4 Conclusions . . . . .	111

<b>3 Outils de conception orientée client</b>	<b>113</b>
3.1 Contexte de l'étude . . . . .	114
3.2 Embouchure à volume variable . . . . .	116
3.3 Méthodes de production des sons . . . . .	117
3.3.1 Bouche artificielle et musicien . . . . .	117
3.3.2 Sons de simulation . . . . .	120
3.4 Tests subjectifs . . . . .	120
3.4.1 Stimuli . . . . .	120
3.4.2 Test 1 : seuil de différentiation . . . . .	121
3.4.3 Test 2 : quantification des différences . . . . .	126
3.4.4 Test 3 : comparaison en brillance . . . . .	132
3.4.5 Test 4 : classement en brillance . . . . .	136
3.5 Etude objective . . . . .	148
3.5.1 Paramètres issus de la courbe d'impédance . . . . .	148
3.5.2 Paramètre issu du signal . . . . .	149
3.6 Corrélations et interprétation des résultats . . . . .	150
3.6.1 Corrélation Brillance - CGS . . . . .	150
3.6.2 Corrélation Brillance - paramètres de la courbe d'impédance . . . . .	151
3.7 Conclusions . . . . .	158
<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>161</b>
<b>Références</b>	<b>165</b>
<b>A Fiches d'évaluation</b>	<b>171</b>
<b>B Résultats des experts (séance d'entraînement)</b>	<b>175</b>
<b>C Résultats du test de la PPDS pour la séance d'entraînement</b>	<b>185</b>
<b>D Résultats individuels de la séance d'évaluation</b>	<b>187</b>
<b>E Optimisation des longueurs des dérivations associées aux pistons</b>	<b>197</b>
<b>F Projet " Evaluation perceptive de sons de moteurs "</b>	<b>203</b>
F.1 Introduction . . . . .	203
F.2 Epreuve de verbalisation libre . . . . .	205
F.3 Epreuve de notation monadique monopolaire (NM) . . . . .	208
F.4 Métrique psychoacoustique des sons . . . . .	217
F.5 Conclusions . . . . .	219





# Introduction

Le champ d'application de la qualité s'est agrandi ces dernières décennies dans la production manufacturière. Le concept de qualité a toujours existé, mais il prend aujourd'hui une dimension plus "humaine". Au début de l'histoire de l'industrie, la qualité des produits issus de l'artisanat était due au savoir-faire de l'artisan qui, puisque seul acteur de la chaîne de conception, contrôlait lui-même toutes les étapes de fabrication. Dans les débuts de l'industrie, vers la fin du *XIX<sup>e</sup>* siècle, la demande n'égale pas encore l'offre. Il n'apparaît donc que mineur de contrôler la qualité d'un produit qui, dans tous les cas, sera vendu. Au début du *XX<sup>e</sup>* siècle, l'évolution des techniques et des machines engendre une complexification des produits qui sont fabriqués "à la chaîne" au bout de laquelle ils sont conservés ou mis au rebut. Il n'est plus possible de fonctionner de cette façon après les deux guerres mondiales, où la notion de rentabilité devient de plus en plus présente. La qualité devient de plus en plus surveillée, et ce, dès la conception du produit. A la fin des trentes glorieuses (1975), les entreprises commencent à s'orienter vers les besoins des clients, pour cerner leurs attentes. Les sens deviennent un champ d'investigation pour les acteurs du marketing. En effet, si le contrôle de la qualité perçue par le consommateur prend de l'ampleur, la prise en compte des perceptions de l'utilisateur apporte de nouvelles données à l'équipe chargée du marketing. Le marketing est une étape essentielle, la première, dans le cycle de vie d'un produit, puisque le besoin est exprimé à ce niveau, basée sur une étude du marché, une observation de la concurrence, des coûts, des avancées des techniques. On parle actuellement de marketing sensoriel, qui étudie le besoin du client en fonction de ses expériences vécues, des sensations et émotions provoquées. Le produit n'est plus un "simple" ensemble de fonctionnalités, il contient également des propriétés sensorielles qui le différencient d'un autre.

A partir des années 90, l'arrivée sur le marché des produits asiatiques augmente de façon significative la concurrence. Il est impossible pour les entreprises européennes de rivaliser avec leurs coûts de production et leurs rythmes de travail. La qualité devient un facteur de compétitivité et un argument commercial. Mais, la qualité technologique est présente dans les produits venus d'Asie. Dans ce nouveau paysage économique, le marché européen atteint une limite en terme de gain de productivité. Pour différencier l'offre en



Europe et rester en compétition, le maître mot de ces dernières années est "l'innovation". Sur le plan technologique, avec la délocalisation des chaînes de production et parfois même des centres R&D, et avec les possibilités de communication offertes par les nouvelles technologies, les idées innovantes fleurissent dans des endroits parfois inattendus. Mais l'innovation se situe également au niveau de la compréhension du besoin du client et de l'image que dégage le produit.

Aujourd'hui, le client est de mieux en mieux informé grâce à internet notamment. Pour un produit donné, il trouve souvent plusieurs produits de performances équivalentes. Son choix est alors orienté par les propriétés sensorielles du produit, autrement dit par sa qualité "perçue" ou par son design. Il est donc nécessaire pour le fabricant d'étudier particulièrement la sémantique des produits (les valeurs connotatives du produit), ses données sensorielles (données issues de l'utilisateur sur les sensations provoquées par le produit). Pour cela, il faut s'intéresser au client lui-même.

Pour résumer, le consommateur peut aider le concepteur du produit à résoudre deux problèmes :

- la définition du besoin, en l'aidant à formuler pendant la phase de marketing un cahier des charges "perceptif" qui correspond à ses préférences ;
- le contrôle de la qualité du produit, dans la boucle de conception/réalisation.

De nombreux domaines utilisent des méthodes centrées sur l'utilisateur. Dans l'alimentaire tout d'abord, avec l'étude du goût et de l'odeur. Ce domaine fut d'ailleurs le premier à utiliser ce que l'on appelle aujourd'hui l'analyse sensorielle. Les cosmétiques firent suite en ajoutant un troisième sens : la vue. Puis, le toucher fut étudié notamment dans le domaine de l'automobile, où le rôle des équipementiers s'est considérablement accru jusqu'à la production de la majeure partie de la valeur du véhicule. Le succès d'une voiture est dû en grande partie à son "intérieur", d'où la nécessité de mettre au point une méthodologie pour définir le besoin du consommateur dans un premier temps et pour évaluer la qualité perçue ensuite. Dans l'automobile, les sens mis en jeu sont bien entendu la vue et le toucher mais également l'ouïe.<sup>1</sup> C'est ce que l'on appelle plus particulièrement le design sonore. Le design sonore consiste à chercher le son le moins gênant, voire, le plus agréable pour les utilisateurs. Les domaines concernés par le design sonore sont par exemple l'automobile, l'aéronautique, l'électroménager. Un autre domaine d'application est celui de l'acoustique des instruments de musique où l'utilisateur, donc le musicien, est très sensible au son produit par son instrument. Il est constaté que dans de nombreux domaines industriels, la prise en compte du client et de ses perceptions est primordiale pour la conception. Notre projet de recherche se situe dans ce cadre. Nous proposons de travailler à la mise au point d'une méthodologie de conception qui intègre l'utilisateur

---

<sup>1</sup>L'étude des bruits de fermeture de portière, des sons des klaxons, des clignotants ou des moteurs par exemple font partie du travail d'un constructeur.

dans la boucle de conception du produit. Pour mettre au point une méthode, il nous a paru nécessaire d'avoir un produit support. Pour des raisons d'opportunités, de contexte et de goût, nous avons choisi de travailler sur les instruments de musique.

Notre étude de conception est appliquée aux instruments de musique de type cuivre. Les travaux menés dans le domaine de l'acoustique musicale sont tout à fait transposables dans d'autres domaines. Cette transposition s'avère même parfois très positive car source de créativité.

Les instruments de musique sont des systèmes passionnants à étudier. Comprendre leur fonctionnement afin de justifier leur conception est un des objectifs premiers des chercheurs en acoustique musicale [BEN 76]. En étudiant ces phénomènes physiques de création du son, ils peuvent développer des outils pour aider la conception de ces produits. Du côté des concepteurs, le succès d'un produit est encore basé sur le talent, le savoir-faire et l'expérience du facteur. La conception et la fabrication n'est pas toujours formalisée et le facteur apporte à un instrument une "âme" particulière. Il est donc normal que l'appréciation d'un instrument se fasse, plus que sur ses caractéristiques techniques, sur des critères perceptifs. Pour comprendre le réel besoin des musiciens en terme de sensation et pouvoir y répondre, la communication doit être mise en place entre les utilisateurs, les fabricants d'instruments et les scientifiques concernés. En effet, pour ce type de produits, les sensations et évaluations perceptives du musicien pilotent la conception et doivent être intégrées lors des phases de conception/amélioration. Plusieurs journées ont été consacrées à ce sujet ces dernières années[ITE 04]. Elles sont répertoriées sur le site du Groupe Spécialisé d'Acoustique Musicale [SFA 05].

Les objectifs de cette thèse touchent deux domaines distincts : le domaine des sciences de la conception et des aspects méthodologiques et, le domaine de l'acoustique musicale, plus particulièrement des cuivres.

Dans le domaine de la conception de produit, nous souhaitons traiter les problèmes suivants :

- Proposer des outils pour connaître le besoin, le formuler et le quantifier, en particulier sur les aspects sensoriels ;
- Prendre en compte les perceptions de l'utilisateur pour définir le cahier des charges d'un produit et ainsi répondre au plus près aux besoins réels du client ;
- Mettre au point une méthode de conception générique qui intègre l'utilisateur dans le processus de conception des produits. En particulier, nous proposons de ne pas limiter l'intervention de l'utilisateur aux phases initiales d'expression du besoin et finale de validation / achat, mais de l'intégrer dans les phases de développement du produit.

Dans le domaine de l'acoustique des cuivres, nous allons aborder les problèmes suivants :

- Montrer comment mettre en place une démarche d'analyse sensorielle pour l'évaluation de la qualité perçue d'instruments de musique ;
- Montrer dans quelle mesure les techniques sensorielles sont adaptées pour mener la conception d'un instrument ;
- Estimer la validité et les limites des outils d'acoustique musicale (simulations par modèle physique, calcul d'impédance acoustique, bouche artificielle) pour une intégration dans une démarche de conception/amélioration d'instruments.

Etant donnée la pluri-disciplinarité de cette thèse, le premier chapitre de ce mémoire s'attache à donner au lecteur les notions de base essentielles à la compréhension de l'étude réalisée. Un état de l'art des méthodes de conception les plus importantes est dressé, puis les notions fondamentales d'acoustiques des cuivres sont présentées. Finalement, nous présentons une analyse bibliographique dans le domaine de la qualité des instruments de musique.

Le deuxième chapitre du document est consacré à la démarche de conception centrée utilisateur que nous proposons. Les étapes de cette démarche sont tout d'abord décrites de manière globale, sans préciser le produit concerné. Nous détaillons en particulier les techniques d'analyse sensorielle utilisées et le rôle de l'utilisateur dans cette démarche. Ensuite, nous présentons l'application de cette démarche pour la reconception d'une trompette, le cahier des charges étant défini par les utilisateurs. Nous détaillons comment ce problème de conception a été traité grâce à l'approche par optimisation.

Le troisième chapitre traite de l'intégration et de la mise au point d'outil de conception d'instruments de musique. Cette étude est basée sur des tests perceptifs d'écoute qui mettent en jeu des sons joués par un musicien, une bouche artificielle et enfin par des simulations par modèle physique. Les outils d'analyse de données ont été utilisés pour étudier les similarités et les différences perceptives entre ces différents sons. Cela permet de définir dans quelle mesure ces outils sont utiles dans une démarche de conception.

Le rapport se termine par 6 annexes notées de A à F. Pour une meilleure fluidité dans la lecture du document, les tableaux de résultats bruts par exemple, se trouvent dans ces annexes. En particulier, l'annexe F présente une partie du rapport de l'étude réalisée avec PSA Peugeot Citroën sur l'évaluation de sons de moteurs, montrant une deuxième application des outils proposés dans notre méthode de conception.

# Etat de l'art

<b>1.1</b>	<b>Conception de produits . . . . .</b>	<b>8</b>
1.1.1	Place du marketing par rapport à la conception . . . .	8
1.1.2	Méthodes rationnelles . . . . .	13
1.1.3	Conception centrée utilisateur . . . . .	20
1.1.4	Conclusions . . . . .	27
<b>1.2</b>	<b>Acoustique des cuivres . . . . .</b>	<b>28</b>
1.2.1	Présentation du produit : la trompette . . . . .	28
1.2.2	Impédance d'entrée . . . . .	32
1.2.3	Cuivres en situation de jeu . . . . .	37
<b>1.3</b>	<b>Qualité des instruments de musique et conception .</b>	<b>43</b>
1.3.1	La relation musicien - facteur . . . . .	44
1.3.2	La relation facteur - physicien . . . . .	45
1.3.3	La relation physicien - musicien . . . . .	46
<b>1.4</b>	<b>Conclusions . . . . .</b>	<b>54</b>

L'objectif de ce premier chapitre est de présenter notre vision de la conception de produit et notre domaine d'application. Le processus de conception est défini par la norme AFNOR 50-127 : "Partant des besoins exprimés, le processus de conception définit pas à pas le produit qui doit répondre aux besoins et aux attentes, par des choix successifs portant sur des points de vue de plus en plus détaillés." Pour mener à bien cette activité, des méthodes définissant une démarche organisée ont été créées. Aujourd'hui, pour satisfaire au mieux les goûts et les besoins du client, il faut pouvoir identifier parfaitement ses attentes et les suivre tout au long de la démarche. Notre thème de recherche place le client au centre du processus de conception.

La première partie de ce chapitre dresse un état de l'art des principales théories classiques de la conception et du marketing qui sont la base d'une méthode de conception centrée utilisateur.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présenterons les notions essentielles de notre domaine d'étude : les instruments de musique de type cuivre, et plus particulièrement la trompette. Cette partie s'articulera autour de trois axes : la description de l'instrument, la présentation de sa caractéristique physique essentielle du point de vue de son comportement acoustique, l'impédance d'entrée et enfin l'explication de son fonctionnement et de la modélisation physique qui peut en être faite.

Dans un troisième temps, nous parcourrons dans la littérature existante les travaux qui portent spécifiquement sur la qualité perçue des instruments de musique, donc, sur la prise en compte du musicien pour étudier la qualité des instruments.

## 1.1 Conception de produits

Lors de sa création, le produit suit un développement qui se décompose en plusieurs phases, depuis la détection du besoin jusqu'à sa mise sur le marché puis son recyclage. Ce développement, appelé cycle de vie du produit, est présenté figure 1.1.

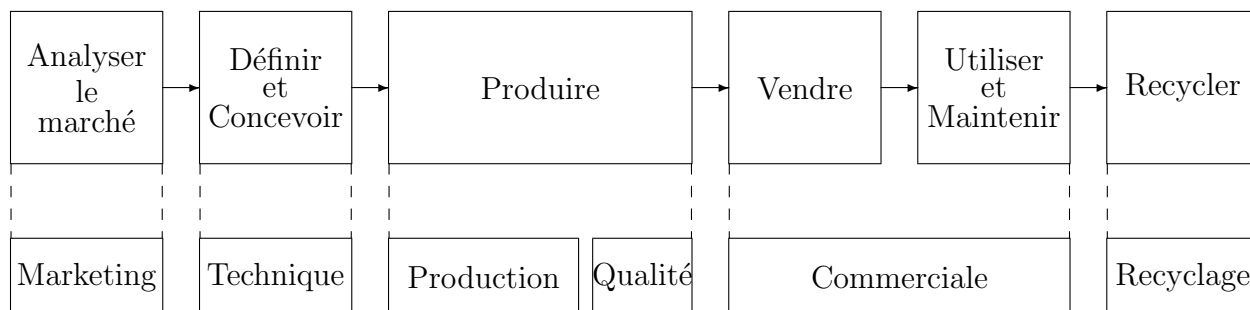


Figure 1.1: Cycle de vie d'un produit

La pérennité d'une entreprise étant directement liée au client, qui décide d'acheter ou non ses produits, il est primordial de prendre en compte sa demande de façon optimale. Dans la pratique industrielle, ce problème a été résolu en reportant sur le service marketing tous les aspects liés au besoin.

### 1.1.1 Place du marketing par rapport à la conception

La phase de marketing est la première du cycle de vie du produit. Elle se situe en amont de la conception. Son objectif est de cerner les besoins du client. Ce chapitre présente la façon dont le client est pris en compte dans cette phase de marketing.

### 1.1.1.1 Définition

La définition du marketing donnée par Vernette [VER 01] est "la conquête, méthodique et permanente, d'un marché rentable, impliquant la conception et la commercialisation d'un produit ou d'un service conforme aux attentes des consommateurs visés." Le terme "permanente" insiste sur le fait que le temps périssant les solutions, le marketing doit être dynamique et doit s'adapter à chaque nouvelle situation.

Les missions du service marketing sont les suivantes :

- mettre en oeuvre toutes les techniques de l'entreprise qui dirigent le flux des biens et des services vers le consommateur ;
- détecter les besoins des consommateurs pour réaliser le produit adéquat, ce qui facilite la vente, (identifier les besoins et les préférences des clients, et les convertir en spécifications) ;
- conquérir des marchés rentables, en utilisant des méthodes scientifiques ;
- mobiliser tous les moyens possibles pour communiquer avec le consommateur du produit (publicité, design...).

Il y a trois conceptions du marketing :

- orientation produit (figure 1.2) ; guidé par les évolutions technologiques, le produit est d'abord conçu, puis le "type" d'acheteur potentiel est recherché afin d'orienter la communication publicitaire vers cette population-cible. Aucune analyse préalable du besoin n'ayant été faite, le risque de ne pas trouver cette population-cible est assez grand.

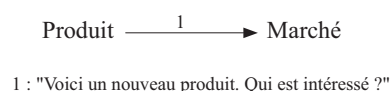


Figure 1.2: Marketing unilatéral : orientation produit

- orientation marché (figure 1.3); un cahier des charges regroupant les exigences du consommateur est fourni par le responsable marketing aux ingénieurs qui vont tenter de respecter le maximum des demandes de l'utilisateur.

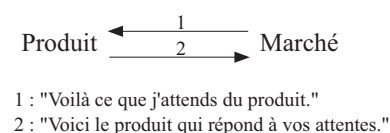


Figure 1.3: marketing bilatéral : orientation marché

- orientation dynamique (figure 1.4); le produit, dont la conception est basée sur un cahier des charges client, est élaboré progressivement, en testant à chaque étape la

concordance avec la demande du consommateur. Une fois le produit sur le marché, le retour ("feedback") est étudié et pris en compte dans les futures démarches de conception.

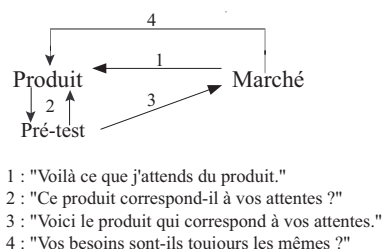


Figure 1.4: Marketing réactif : orientation dynamique

Dans la première méthode, c'est la technologie qui guide la conception et qui définit le produit. Le client n'intervient pas et n'est donc même pas interrogé sur ses besoins. Dans la deuxième méthode, l'entreprise fournit un produit en réponse aux exigences du consommateur. Si l'expression du besoin est une étape cruciale, il est rare que le client et le concepteur s'entendent parfaitement, ne serait-ce que sur la faisabilité technique du produit en fonction des demandes. Il est nécessaire de boucler cet échange jusqu'à l'installation d'un compromis. Le marketing bilatéral ne prévoit qu'un aller-retour de l'information. La dernière méthode, qui valide chaque étape par une demande au consommateur semble plus adaptée pour coller au mieux au besoin du client. Cependant, elle nécessite beaucoup de tests qui sont coûteux en temps et en argent. Il faut alors trouver un compromis entre ces méthodes pour prendre en compte le client dans un temps modéré.

#### 1.1.1.2 Le consommateur et la segmentation du marché

Il n'est pas réaliste de considérer le marché comme composé de consommateurs ayant un comportement identique. De nombreuses caractéristiques individuelles peuvent permettre de différencier les clients et leurs choix. Plutôt que de commercialiser leur produit globalement à l'ensemble des individus, une entreprise a intérêt à identifier des segments auxquels elle peut répondre de la meilleure façon. Il s'agit donc pour l'entreprise de définir une "cible", en évaluant les risques financiers, les risques de trop forte concurrence et les possibilités en ressources humaines. Pour cerner les besoins effectifs, le marché doit être découpé en groupes de consommateurs homogènes selon un critère particulier. Ce critère peut être lié à l'âge, au sexe, à la catégorie socio-professionnelle, à la localisation géographique, au revenu par exemple. En plus de ces caractéristiques socio-démographiques, il faut étudier l'individu dans son environnement social et se pencher sur sa personnalité, ses valeurs, l'image qu'il veut renvoyer et son style de vie. Il est important de comprendre quelles sont les personnes influentes autour du consommateur :

- la famille : époux et enfants déterminent les achats ;

- le groupe d'appartenance : le choix du client est orienté par la façon dont il sera considéré lorsqu'il possédera le produit ;
- les leaders d'opinion : le look d'un artiste va influencer celui de ses fans.

Ce découpage du marché s'appelle la segmentation et les groupes formés des segments.

Les objectifs de la segmentation sont :

- constituer des groupes d'individus (segments) aussi semblables que possibles à l'intérieur d'un groupe et aussi différents que possible d'un groupe à l'autre;
- choisir, parmi les variables explicatives caractéristiques du groupe, la ou les variables qui différencient le plus le comportement à expliquer.

Le choix du critère de segmentation se fait en fonction du produit visé. Par exemple, pour trouver les segments du marché du livre, le critère s'orientera vers le niveau d'instruction, pour les media, l'équipe marketing s'intéressera à l'âge du consommateur plus particulièrement.

Cet outil marketing comprend ensuite le choix d'une cible, l'adaptation du produit à cette cible et la vérification des résultats. Cette méthode doit être complétée par une étape de positionnement du produit sur le marché. En effet, mettre en vente un produit qui est déjà fabriqué par la concurrence est très risqué. Il faut singulariser le produit.

### 1.1.1.3 Le positionnement du produit par rapport aux attributs perçus

Pour expliquer le fait qu'ils aient acheté ou non un produit, les consommateurs parlent "d'attributs perceptifs" comme la couleur, l'esthétique, le confort,..., alors que l'équipe marketing parle en termes d'objectif de marché, qui pour elle sont essentiels. La demande est formulée de manière perceptive et l'offre de manière objective. L'entreprise doit sélectionner les attributs perceptifs qui lui permettent de maximiser son objectif. C'est l'étape de positionnement du produit, propre à la phase de marketing. La superposition des données d'offre et de demande sur des cartes perceptuelles facilite les choix stratégiques, en permettant de repérer facilement le positionnement des entreprises concurrentes. Le choix d'un bon positionnement procure les avantages suivants :

- différenciation par rapport aux concurrents sur des marchés encombrés, recherche de la distance idéale par rapport aux concurrents ;
- stimulation de l'innovation par la découverte de créneaux inexploités ;
- aide à la gestion d'un portefeuille de marques.

Comme le montre la figure 1.5, le marketing se situe en amont de la phase de conception, sans interactivité.

Dans la plupart des cas, le problème du positionnement du produit est résolu indépendamment de sa conception, alors que positionnement et conception sont directement



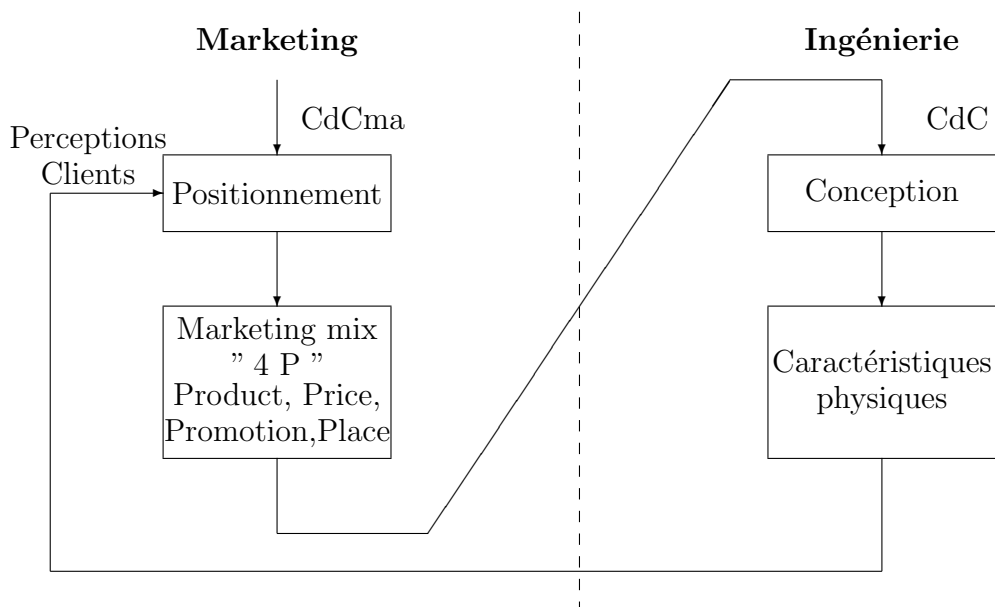


Figure 1.5: Illustration de la séquentialité des étapes de marketing et de conception.

liés. Le marketing renvoie des attributs perceptifs comme par exemple le look jeune d'un produit, le caractère innovant. Mais, cela est loin de définir le produit d'un point de vue technique. Le client compare les produits par rapport à ses attributs et l'ingénieur par rapport à ses caractéristiques. La difficulté se situe dans le fait que la relation entre les attributs perceptifs et les caractéristiques techniques n'est pas immédiate. Hauser et Simmie [HAU 81] ont montré qu'un produit jugé efficace dans l'espace des attributs l'est également dans l'espace des caractéristiques mais que l'inverse n'est pas vrai. Or, c'est au concepteur que revient la tâche de passer des attributs perceptifs aux variables de conception (taille, matériau utilisé, composants employés...).

Les perceptions du clients sont prises en compte dans la partie marketing. Ces attributs du produit fournissent des contraintes pour l'équipe de conception qui doit déterminer les variables de conceptions du produit. Ce n'est qu'à la fin de l'étape de conception que le client peut enfin évaluer le produit. Pour étudier ses perceptions par rapport au produit, le processus implique un bouclage sur l'étape de marketing pour repositionner le produit (Figure 1.5). Le temps passé à ce bouclage est considérable. C'est pourquoi, le besoin d'interactions entre le marketing et la conception se fait sentir. Certains chercheurs cherchent à intégrer le marketing dans la démarche de conception [GUP 01]. La prise en compte pertinente des attentes perçues par les clients nécessite une évolution au sein même du processus de conception de produits, et non uniquement une amélioration des techniques de marketing.

Nous allons par la suite présenter deux méthodes classiques visant à rationaliser la conception : la conception algorithmique et l'analyse fonctionnelle. Nous en verrons leurs limites par rapport à la prise en compte du client et aborderons d'autres méthodes visant

à intégrer le client au coeur de la démarche de conception.

## 1.1.2 Méthodes rationnelles

### 1.1.2.1 Conception algorithmique

Certains auteurs ont vu la conception comme une activité de résolution de problèmes puisqu'elle peut être formalisée selon 3 étapes : collecte d'informations, élaboration d'une solution (création) et validation de la solution. Cela implique une analyse pas à pas du problème/besoin. Pour cela, Pahl et Beitz [PAH 96] proposent une approche systématique de la conception, approche dite séquentielle. L'activité de conception est découpée en différentes phases, se déroulant successivement selon un processus séquentiel. Le fait de devoir valider chaque étape pour passer à la suivante permet de formaliser les résultats de chaque phase et de les rendre compréhensibles et exploitables pour les acteurs suivants. Plusieurs personnes de corps de métier différents sont donc amenées à échanger leurs points de vue, ce qui est très constructif et stimulant pour les protagonistes. Il est souvent très difficile de trouver un langage commun entre deux métiers. Plusieurs itérations sont parfois nécessaires pour obtenir un accord. Le découpage en phases permet de boucler entre deux tâches et non pas de repartir de l'origine du problème de départ (cf figure 1.6).

Les quatre phases définies par Pahl & Breitz [PAH 96] dans la démarche de conception sont (figure 1.7):

- Planning and clarifying the task,
- Conceptual design,
- Embodiment design,
- Detail design.

La méthode propose des directives qui doivent bien sûr être adaptées à chaque situation, les frontières entre les 4 phases n'étant pas totalement figées. Le temps écoulé, les ressources insuffisantes ou l'obtention d'une solution satisfaisante sont les critères d'arrêt des phases. Dans le schéma n'apparaissent que les principales actions à réaliser (n'apparaissent pas les actions "évidentes" comme la vérification des résultats) et les étapes décisionnelles.

Détaillons maintenant les objectifs des 4 étapes de la méthode.

- **Planning and clarifying of the task** : planification et clarification du problème. Le fait de découper le problème en plusieurs étapes successives permet de fixer plus précisément un planning. Pour réussir ce processus de planification, il faut prendre en compte le marché, le positionnement de l'entreprise et l'économie du moment. Ensuite, il faut lister les attentes auxquelles le produit doit répondre. Cette étape aboutit donc à une liste de spécifications (requirement list) que doit respecter le produit.

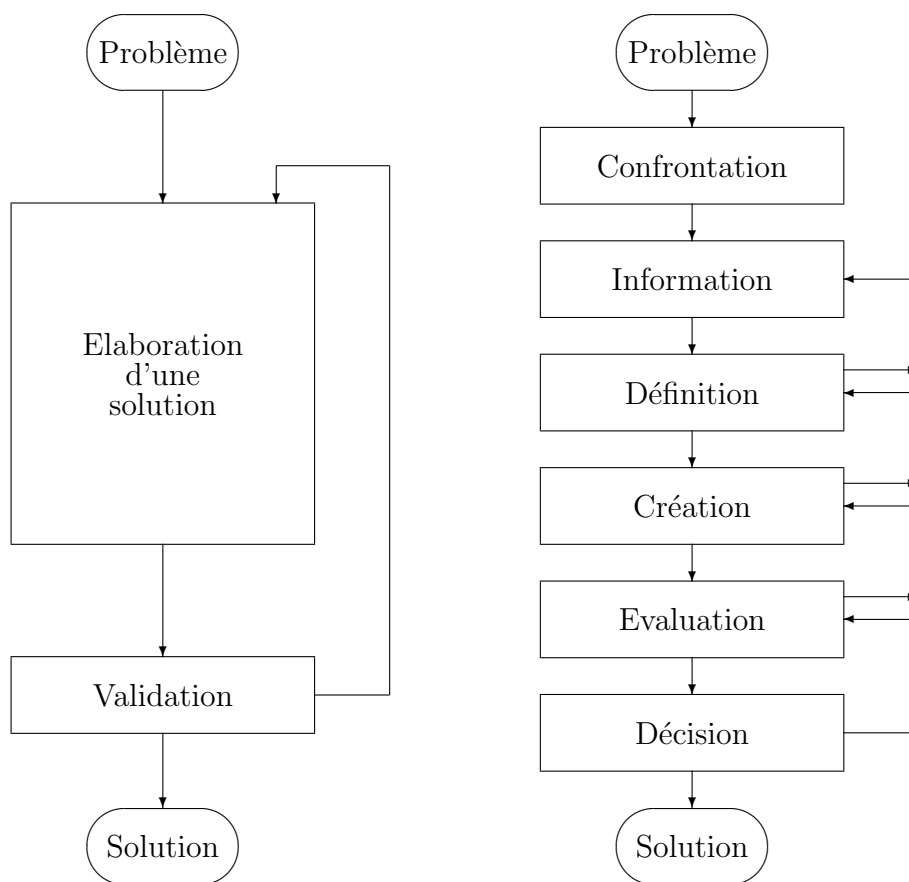


Figure 1.6: Les deux méthodes générales de recherche de solutions : sans décomposition, et avec décomposition.

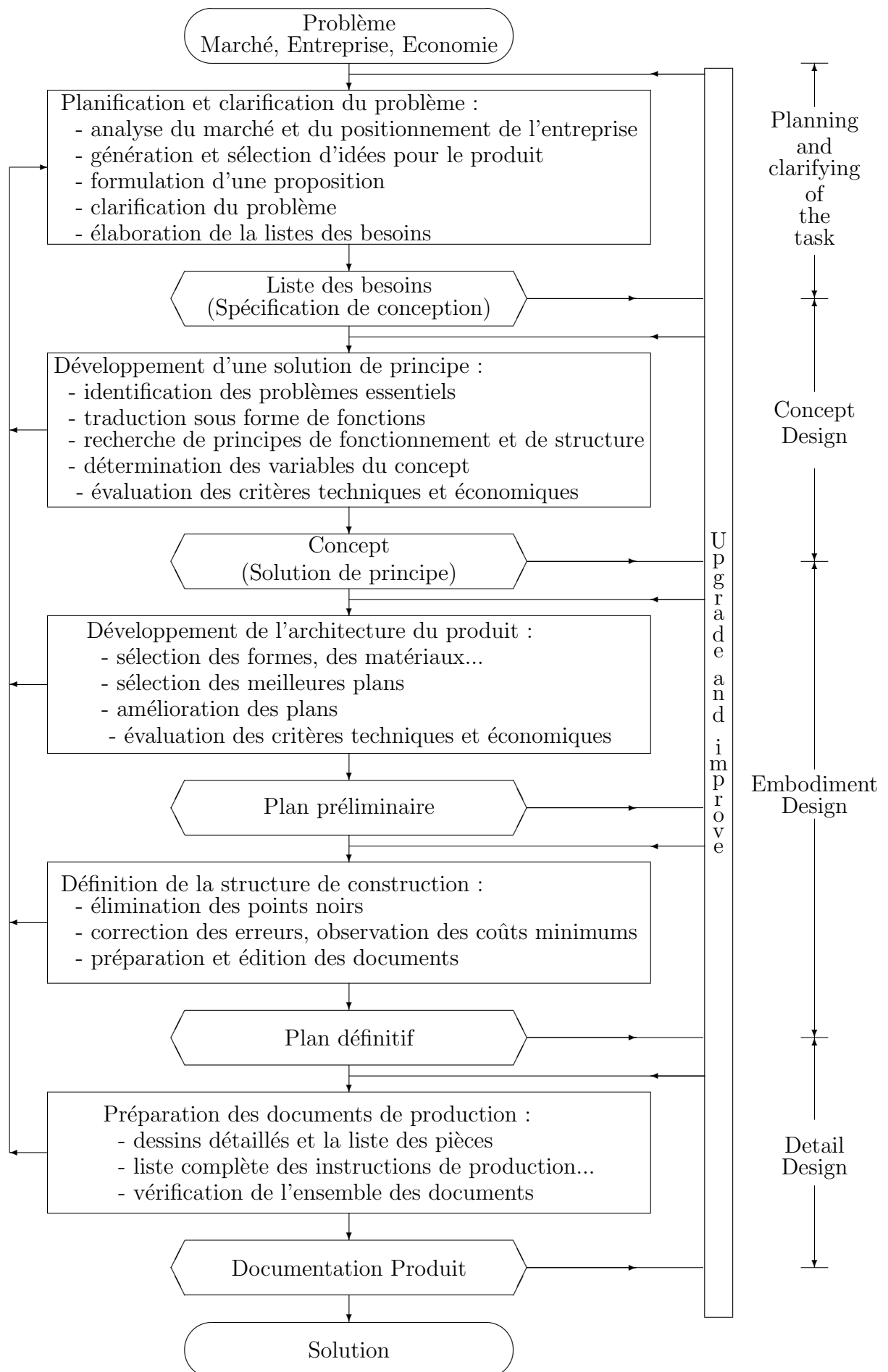


Figure 1.7: Les étapes du processus de planification et de conception de Pahl & Beitz [PAH 96]

- **Conceptual Design** : Conceptualisation. Les besoins sont triés par ordre d'importance, les besoins essentiels étant traduits sous forme de fonctions. Une solution de principe (parfois plusieurs) est finalement fournie, comme un schéma cinématique en mécanique par exemple.
- **Embodiment Design** C'est la phase de travail plus concrète, avec la recherche d'une architecture adaptée et la présentation de plans pour le produits. Ces plans temporaires sont révisés et détaillés jusqu'à obtenir la meilleure solution. Cette étape peut être longue car chaque nouvelle solution technique proposée soulève de nouvelles questions tant sur la faisabilité que sur le point de vue économique. Le plan devient finalement définitif.
- **Detail Design** : Conception détaillée. Dans cette phase sont décidés les matériaux utilisés, la forme des pièces, l'estimation des coûts, les plans détaillés de chaque sous-ensemble du produit...

Chacune de ces 4 phases est décomposée en étapes à suivre. Chacune des tâches fournit un résultat indispensable au déclenchement de la tâche suivante. Pour chaque tâche sont précisées des règles de base, des principes à suivre, des directives, des outils à utiliser. Cette organisation de la conception permet l'utilisation d'outils de planification et une meilleure gestion des coûts et des risques. La séquentialité du processus permet quant à elle de pouvoir faire évoluer le produit au long du processus de conception, sans réitérer un trop grand nombre d'étapes. En revanche, le client n'est présent que dans la première étape de la méthode, et cette approche n'explique pas comment prendre en compte ses attentes.

### 1.1.2.2 Analyse fonctionnelle

Ce chapitre présente le concept d'analyse fonctionnelle et plus particulièrement comment l'analyse fonctionnelle traite les aspects orientés "clients" du besoin.

Il est devenu indispensable pour les entreprises de mettre en place des démarches "qualité", de certifier ses produits, pour rassurer le consommateur et orienter son choix. La notion de qualité peut se décomposer en deux parties [TAS 92] :

- la qualité "perçue",
- la qualité "fonctionnelle".

La qualité "perçue" regroupe tous les critères d'ordre esthétique, basés sur le sens visuel, puis le toucher ou l'odorat, soit les sens mis en jeu au premier contact avec le produit. Ainsi, le consommateur se dirigera vers un objet qui a une qualité "apparente". Il est donc indispensable de travailler cette apparence. Ces fonctions, qui répondent au désir de l'acheteur et non pas au fonctionnement ou performance du produit, sont appelées fonctions d'estime. Cependant, si le produit attire l'oeil du client, il n'est pas pour autant

déjà acheté.

Le client s'intéresse également à la qualité "fonctionnelle" du produit. Si un roman attire l'oeil du consommateur mais qu'il est écrit dans une langue qui lui est étrangère, il ne l'achètera pas car le livre perdrait toute sa fonction (divertir, instruire le lecteur). Les fonctions d'un produit peuvent donc être classées en 2 catégories :

- les fonctions d'usage, liées à l'aspect utilitaire du produit ;
- les fonctions d'estime, ayant un impact psychologique ou affectif sur l'utilisateur du produit.

Il est aisé pour le consommateur de se rendre compte d'une non-qualité perçue. Par contre, si le produit est de bonne qualité apparente, il est souvent plus difficile de détecter sa non-qualité fonctionnelle. Le client s'en rendra compte au moment de l'utilisation du produit et regrettera son achat. Cette non-qualité fonctionnelle peut être due à l'impossibilité technique de faire mieux, mais elle est plus souvent la conséquence de la non prise en compte des réels fonctions attendues par le client. Pour éviter ce problème, l'analyse fonctionnelle est utilisée dans les premières phases d'un projet pour créer ou améliorer un produit [FAN 94]. Elle propose de rechercher, d'ordonner, de caractériser, de hiérarchiser et/ou de valoriser les fonctions attendues par l'utilisateur. L'analyse fonctionnelle se base sur le principe simple qu'un produit n'a de "raison d'être" que s'il satisfait le client.

En fait, l'analyse fonctionnelle s'inscrit dans une démarche de conception plus large, où le client est interrogé (sondage...) dès le début afin de cerner au mieux ses besoins et attentes (cf figure 1.8).

Les fonctions d'un produit étant directement liées au besoins du client, elles sont classées en deux familles :

- les fonctions d'usage, répondant aux besoins objectifs (performances, sécurité, durabilité...) ;
- les fonctions d'estime, répondant aux besoins subjectifs (image de marque, image plus jeune, design...).

Il est évidemment plus difficile de quantifier les besoins subjectifs. Par besoin, nous n'entendons pas simplement nécessité vitale comme le fait de devoir s'hydrater ou s'alimenter. Le besoin est défini comme la perception chez une personne d'un manque ou d'un excès de ce qui lui est nécessaire." Pour le percevoir, on peut s'intéresser à l'utilité des produits: "A quoi sert-il vraiment ?" Dans un deuxième temps, il faut s'interroger sur la durée de vie commerciale du produit (articles pour la plage l'été ou usage domestique fréquent), afin de valider le besoin et de le cerner complètement. Ensuite, il faut exprimer le besoin, c'est-à-dire en analyse fonctionnelle, traduire chaque composante du besoin en terme de fonction (Figure 1.9).

Les fonctions sont définies en termes de finalité et non de moyens. Elles n'expriment

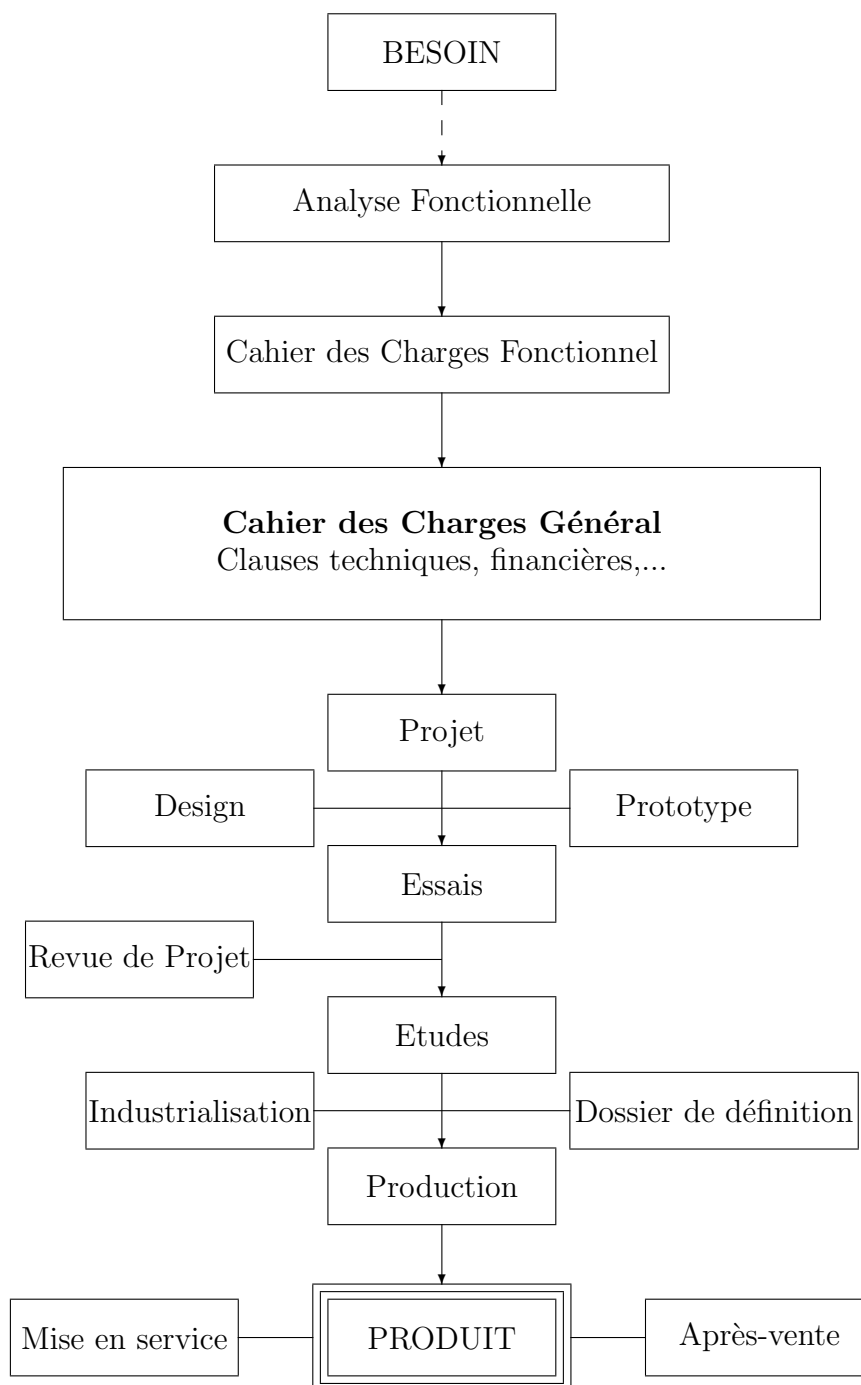


Figure 1.8: Etude et développement d'un nouveau produit

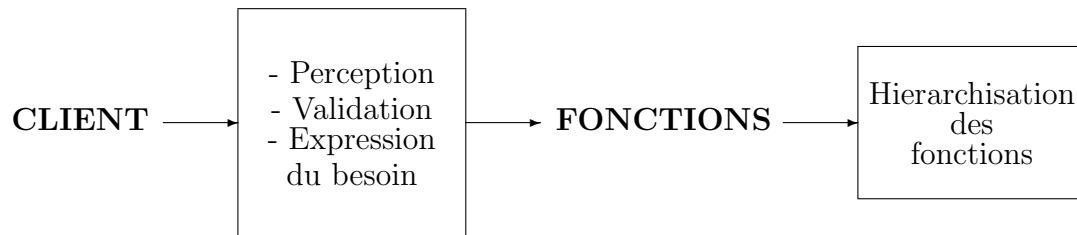


Figure 1.9: Les étapes essentielles de l'analyse fonctionnelle

pas la façon dont on va permettre au produit de faire cela, mais, ce qu'il doit faire. Les fonctions sont classées en 4 grandes catégories :

- les fonctions principales de service : ce sont celles pour quoi l'objet a été conçu (ex : pour une lampe, fournir de la lumière),
- les fonctions complémentaires de service : elles correspondent à un besoin complémentaire (ex : une table de jardin doit pouvoir permettre le passage du pied de parasol),
- les contraintes : elles dépendent des conditions d'utilisation du produit (environnement), les technologies de fabrication, le respect des normes (brevets, loi),
- les fonctions techniques : elles regroupent les fonctions de conception et de construction.

A partir de la liste de ces fonctions à satisfaire, associée à d'autres informations (étude de l'existant, fonctions des produits concurrents, les coûts des matières de bases...), l'analyse fonctionnelle doit fournir un cahier des charges fonctionnel (CdCF) qui exprime le résultat attendu sans se soucier des solutions. C'est un document par lequel la maîtrise d'ouvrage exprime son besoin pour le projet. Il est utilisé dans la suite de la démarche de conception (Figure 1.8) au cahier des charges technique et financier pour créer un cahier des charges général. Le problème de l'analyse fonctionnelle est que, si les besoins sont exprimés, les moyens d'action pour les atteindre ne sont nullement abordés. Les besoins sont exprimés dans un cahier des charges qui passe alors dans une autre équipe qui va devoir chercher des solutions aux problèmes et aux demandes des clients. Les solutions vont donc être proposées par des personnes qui n'auront donc pas été en contact avec les clients.

### 1.1.2.3 Limites des deux méthodes présentées

L'inconvénient majeur de ces deux méthodes prescriptives que sont la conception algorithmique et l'analyse fonctionnelle réside dans le manque d'intervention du consommateur. En effet, s'il participe à l'élaboration de la liste des besoins dans la partie marketing et donc à la clarification du problème, son rôle ne va pas au-delà. Un cahier des charges



”sensoriel” est fourni aux ingénieurs qui prennent le relai pour développer un produit lui correspondant. Or, certaines difficultés techniques ou financières obligent les concepteurs à trouver un compromis entre la demande et la faisabilité. Par ailleurs, il est impossible de capter l’intégralité du besoin a priori, le champ d’incertitude sur la demande du client reste alors trop large. Les ingénieurs sont donc souvent amenés à faire des choix, sans en référer au consommateur, ce qui risque d’éloigner le produit final du besoin du client. Une autre limite de ces méthodes par étapes est la non prise en compte du côté évolutif de la demande. Le besoin est exprimé au début, puis transmis et interprété de manière séquentielle jusqu’à la production. Entre l’expression du besoin et la mise sur le marché du produit, il peut s’être écoulé beaucoup de temps, et le besoin du client peut avoir évolué.

Pour repousser ces limites, plusieurs démarches de conception prenant en compte le client tout au long de la méthode ont été proposées. C’est ce que l’on appelle la conception orientée client, centrée utilisateur, ou encore anthropocentrée.

### 1.1.3 Conception centrée utilisateur

#### 1.1.3.1 Méthode QFD

Comme dit précédemment, le client est de plus en plus exigeant. Il ne demande plus seulement le produit mais également le service et les informations associées, pour un prix raisonnable. De plus, la concurrence se développe dans tous les domaines et les risques grandissent également, fragilisant les entreprises. Le mot d’ordre pour vendre ses produits est donc devenu aujourd’hui la qualité. Et la qualité doit intervenir à tous niveaux de l’entreprise : c’est ce qu’on appelle la qualité totale d’une entreprise [GIO 98] (Figure 1.10). Elle passe d’un côté par l’écoute du personnel et l’amélioration de leur conditions de travail, et de l’autre côté par l’étude de l’adaptation du produit à la demande et de la perspicacité des services à y adjoindre.

Pour obtenir la satisfaction totale du client, il faut pouvoir comprendre pleinement sa demande. Dans la société industrielle d’aujourd’hui, où la distance croissante entre les producteurs et les utilisateurs est un problème, la méthode du QFD (*Quality Function Deployment*) traduit les besoins des utilisateurs et les relie avec les différentes étapes de la vie d’un produit. La demande du client devient la cible de chaque étape, tant en conception qu’en développement ou production. En d’autres termes, le QFD est une méthode pour introduire la qualité dès le stade de la conception, afin de satisfaire le client [AKA 93]. La méthode QFD aide les concepteurs de produit à identifier explicitement les besoins des consommateurs, les corrélérer aux caractéristiques techniques données par les ingénieurs, et évaluer les caractéristiques potentielles du produit par rapport à ceux déjà existant sur le marché [AUN 03].

La première étape du QFD est l’établissement des qualités demandées par le client,

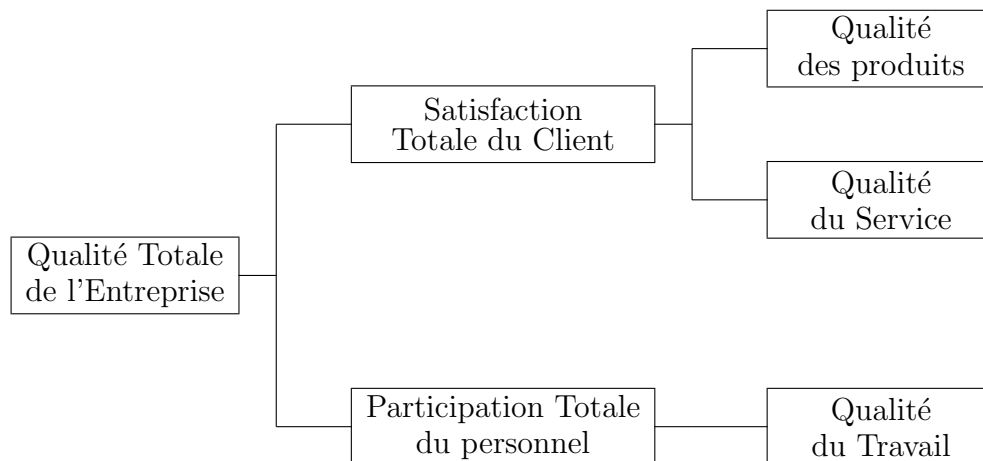


Figure 1.10: La qualité totale d'une entreprise

dans son langage. Celui-ci étant différent de celui des concepteurs, ces données "brutes" doivent être analysées et reformulées par l'équipe QFD, puis réorganisées en un diagramme d'affinité, c'est-à-dire par groupe de demandes évoquant la même sensation, chaque groupe recevant une étiquette générale [LOW 99]. Ces données sont ensuite représentées de façon hiérarchique dans un diagramme de déploiement de la qualité demandée [AUN 03].

La représentation la plus caractéristique du QFD est "the House of Quality" (Figure 1.11). Cette matrice, adaptable à tout type de problème, regroupe des données multidisciplinaires, et s'articule autour de 6 points :

- les exigences du client, sous forme d'une liste de demandes issues des consommateurs ;
- les contraintes techniques, sous forme d'une liste de paramètres physiques incontournables du produit ;
- la matrice de planification, fruit de l'observation des études de marché, incluant le positionnement du produit et de l'entreprise par rapport à la concurrence ;
- la matrice des corrélations, exprimant les liens entre les demandes clients et les paramètres techniques ;
- la matrice technique des corrélations, exprime si l'aspect technique permet ou empêche de coller à la demande ;
- les priorités techniques, exprimant les priorités techniques en termes de performance pour bien se situer par rapport à la concurrence.

Cette matrice permet de cerner les problèmes d'incompatibilité demande-faisabilité et d'adapter avec le client les exigences aux contraintes techniques. L'objectif de cette représentation est de définir les caractéristiques techniques du produit (hauteur du véhicule

par exemple) transformées ensuite en critères physiques (diamètre des roues) en prenant en compte le client. Le principal avantage de cette représentation en matrice est que l'on peut lire les données dans tous les sens et tenter de relier tous les paramètres entre eux.

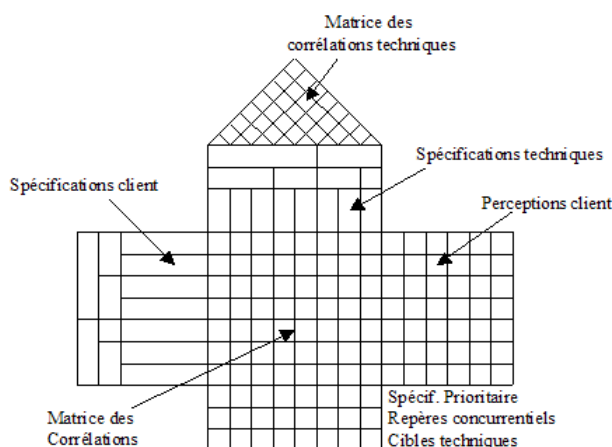


Figure 1.11: Exemple d'une "House of Quality"

On voit donc que tous les départements d'une entreprise doivent participer au QFD. En effet, si le secteur production ne donne pas ses contraintes, les "promesses" faites au client seront irréalisables et découvertes au moment de la production, donc trop tard. Si l'étape de récolte d'informations (client, concepteur, producteur...) est essentielle, elle doit être associée à l'étape de classement, d'établissement des priorités et des cibles pour le produit. En effet, une trop grande masse d'informations peut noyer l'entreprise et l'orienter vers des choix non prioritaires. Etablir les priorités constitue donc une activité primordiale du QFD. Le point fort du QFD est de résumer sur un diagramme toutes les informations nécessaires à la mise sur le marché d'un produit. Cette matrice représente un sérieux gain de temps dans la recherche d'informations. Les points faibles de cette technique sont tout d'abord la difficulté à récolter les informations pour remplir cette matrice puis la "grossiereté" du modèle de dépendance qui relie directement des "perceptions" à des variables de conception, ce qui semble un peu trop direct.

Pour étudier les perceptions des utilisateurs et tenter de les relier à des critères physiques, une méthode venant du Japon, appelée Kansei Engineering, met en avant la pluralité des sensations et tente d'en dresser une liste selon le produit testé, puis de les relier aux variables de conception.

### 1.1.3.2 Kansei engineering

Kansei est un terme japonais difficile à traduire exhaustivement (Figure 1.12). "Kan" signifie sens et/ou sentiment, et "sei" se rapporte à la nature, à ce qui est né, en vie. Le kansei regroupe donc les notions de sentiments, d'émotions, d'affectivité, et se traduirait par les sentiments et les besoins du consommateur par rapport au produit [YOS 04], par

l'image psychologique d'un produit nouveau [NAG 95]. Une traduction ne pouvant pas, à elle seule, décrire ce puissant concept japonais, nous garderons naturellement le terme de *kansei*.

Nos 5 sens nous permettent d'accéder à des familles de sensations très différentes que nous vivons mais qu'il nous est parfois très difficile à décrire. Si nous pouvons nous étendre sur la description visuelle d'un objet, en tant que non spécialistes, notre vocabulaire descriptif des odeurs se limite rapidement. Ce vocabulaire ne permet souvent pas de différencier deux produits et empêche donc le concepteur d'approcher la demande du client. Or, de plus en plus, le consommateur est exigeant et désire acheter un produit qui correspond vraiment à sa demande et à ses préférences [YOS 04]. Le *kansei engineering* est défini comme une méthode qui met en relation les sentiments des utilisateurs envers un produit avec des paramètres spécifiques de leur conception. Cette méthode a pour but de transférer les *kansei* dans le domaine d'application de l'étude et d'aider la conception. Cela se présente sous la forme de grandes bases de données montrant les correspondances entre produit et image.

## 感性工學

Figure 1.12: Le Kansei Engineering

Le *kansei engineering* se décompose en 4 phases :

- **Définition des *kansei*** : capter le subjectif, le sentiment du client par rapport au produit sur un plan ergonomique, psychologique (image renvoyée...). La principale technique d'extraction des *kansei* du consommateur est la méthode du différentiel sémantique. Développé par Osgood, cet outil permet de mesurer les connotations des objets et des images [MAN 04]. Le principe est de créer une base de mots la plus large possible, mots trouvés dans les magazines spécialisés, dans les retours des clients, dans les conversations d'échanges d'avis de consommateurs... Les termes les plus appropriés seront sélectionnés pour former la liste d'adjectifs (un terme et son opposé) de l'étude. Chaque terme de la liste est ensuite évalué par le consommateur. Par ce biais, il donne son impression globale sur le produit. Ces évaluations servent ensuite de données d'entrée pour les outils d'analyse (ACP par exemple) aidant à la prise de décision en conception.
- **Définition des paramètres de conception** : cette étape correspond à l'identification des critères physiques du produit qui influencent les *kansei* trouvés précédemment. Il ne s'agit pas simplement de mesurer l'objet. Son utilisation (prise en main, poids, équilibre...) est aussi à étudier avec des mises en situation de consommateurs.
- **Le traitement des données** : recherche de règles d'inférence entre les données de

l'étape 1 et de l'étape 2. Le résultat de ces traitements est une base de données de renseignements concernant le produit.

- **L'actualisation des bases de données** : le kansei implique également les comportements des utilisateurs (selon les modes, les changements sociaux, événements ponctuels...). Cela l'oblige à être dynamique. Les bases de données ne sont donc pas figées et doivent être mises à jour tous les 3/4 ans.

Il y a trois styles de procédures de kansei engineering : Type I, II et III [NAG 95]. Le Kansei engineering **type I** présente le produit sous forme d'un arbre. A la base de cet arbre, on trouve la qualité que l'on attend du produit en général, puis, cette qualité est découpée en sous-ensembles l'influencant. On répète cette opération jusqu'au niveau où les adjectifs sensoriels appartiennent à la base et correspondent à des critères physiques du produit. L'exemple le plus souvent cité pour illustrer ce type I est celui de la Mazda "Miata" (Figure 1.13), développée avec ce type d'approche. Au niveau 0, le concept à atteindre est



Figure 1.13: La mazda miata

MDO (Machine and Driver as One) soit le conducteur et son véhicule ne formant qu'un. Ce concept a été découpé en 4 sentiments : pour ne former qu'un avec son véhicule, le passager doit sentir le véhicule adapté à sa taille, proche de lui, rapide et avec lequel il peut communiquer. Ces 4 notions sont tour à tour étudiées pour arriver jusqu'au kansei connus et donc aux critères physiques à modifier (taille du véhicule pour la proximité, son du moteur pour la rapidité...). Une autre application concernant l'automobile (intérieur de voiture) est donnée par Tanoue [TAN 97].

Le Kansei engineering **type II** est un système (Kansei Engineering System) assisté par ordinateur composé de 4 bases de données :

- une base de données Kansei : elle représente les sentiments des utilisateurs sur un produit,
- une base de données d'images faisant correspondre à des mots du kansei des paramètres de conception du système,
- une base de données des connaissances exprimant le degré de corrélation, les règles d'inférence entre les paramètres de conception et les mots du kansei,
- une base de données couleurs et formes, les corrélant à des termes du kansei.

Le consommateur rentre alors les images qu'il a du produit et par association des bases, l'ingénieur peut retrouver les variables de conception qui lui correspondent le mieux. Le KES peut être très utile notamment dans la conception de produits nouveaux.

Le kansei engineering **type III** est un modèle mathématique basé sur la logique et qui remplace les lourdes bases de données du KES. Un exemple d'utilisation est donné par Fukushima [FUK 95] sur l'amélioration d'une image produite par une imprimante couleur.

La difficulté qui persiste dans ces techniques est de capter et d'interpréter la réponse perceptive des utilisateurs. Pour cela, l'analyse sensorielle propose de nombreuses méthodes pour étudier les caractéristiques perceptives d'un produit et d'en évaluer sa qualité.

### 1.1.3.3 Analyse sensorielle

L'analyse sensorielle a été développée dans le domaine de l'alimentaire grâce aux travaux de Rose-Marie Pangborn (1932-1990). Cette chercheuse américaine a étudié les perceptions humaines des aliments, et en a formé une discipline à part entière. Ce sont donc les laboratoires du secteur agro-alimentaire qui ont les premiers adopté cette démarche, en centrant principalement leurs études sur le goût et l'odorat. Un peu plus tard, c'est le domaine des cosmétiques, puis de l'automobile, il y a une dizaine d'années, qui exploitent ces outils.

Pour récolter des données organoleptiques, l'homme devient un instrument de mesure. Il participe à différents tests pour fournir une réponse perceptive. Outre les épreuves hédoniques, il existe deux grandes familles d'épreuves :

- les épreuves discriminatives : l'objectif de ce type d'épreuve est de détecter la présence ou l'absence de différences perceptuelles entre les produits, sans avoir à en justifier / expliquer la raison. Dans un second temps, elles permettent de graduer l'intensité des différences. Ces épreuves sont donc à choix forcé et ne permettent pas de quantifier les différences [DEP 98]. Elles sont utilisées en complémentarité des épreuves descriptives;
- les épreuves descriptives : le but est d'étudier la nature des différences perçues.

Dans les épreuves descriptives, les plus connues sont les épreuves de cotation et de notation. La cotation peut se faire sur une échelle graduée (échelle structurée) ou non (échelle non structurée). Le sujet doit placer chaque échantillon sur l'échelle choisie. Ces épreuves de cotation incluent également toutes les épreuves de classement des échantillons. Pour cette famille d'épreuves descriptives, les testeurs sont la plupart du temps entraînés, l'utilisation de l'échelle notamment n'étant pas innée. De plus, les sujets doivent être répétables pour avoir des résultats exploitables. De plus, une difficulté majeure des sujets est de ne pas tenir compte dans leur jugement de leurs préférences.

Pour avoir les données de préférence, d'autres épreuves dites hédoniques, c'est-à-dire se

rapportant au caractère plaisant ou déplaisant, sont réalisées. Les sujets sont alors naïfs, donc non entraînés aux épreuves d'analyse sensorielle. La consigne dans une épreuve hédonique est de coter sur une échelle le caractère agréable de l'échantillon.

Il existe bien entendu de nombreuses méthodes d'analyse de données, de statistique pour traiter les résultats issus des tests. Nous détaillerons dans le rapport les méthodes employées dans notre étude à chaque première utilisation.

Dans le domaine de l'analyse sensorielle, la métrologie sensorielle constitue la mesure des sensations. Elle est utilisée dans plusieurs études visant à prendre en compte les perceptions du clients dans le processus de conception.

#### 1.1.3.4 Autres outils de conception centrée utilisateur

Le consommateur est le plus souvent oublié dans la démarche de conception. Son avis est considéré comme trop "subjectif" pour être compatible avec des données techniques. Mais le produit n'est pas seulement un ensemble de fonctionnalités et de contraintes techniques. Le consommateur y affecte également une valeur, des sensations. Certes, les sensations ne sont pas gouvernables et "tous les goûts sont dans la nature", mais n'y a-t-il pas des mécanismes de perceptions communs à tous les utilisateurs d'un même produit ? Bassereau & al [BAS 00] définissent cet invariant perceptif comme le "réfèrent", qui est "tout ce qui est partagé par "n" individus". Plus qu'au processus de conception, ils s'intéressent au processus de perception du consommateur, dans le but de pouvoir prédire ses sensations. Ils cherchent le lien entre le référentiel de conception et celui des perceptions puis passent d'une méthode de conception technocentrée à une méthode dite anthropocentrée.

D'autres démarches centrées utilisateur, appliquées à différents domaines ont été mises en place. L'analyse fonctionnelle a servi de base à Raphaëlle Dore [DOR 04] qui propose, par exemple, une méthode qui intègre les sensations utilisateur en conception préliminaire, avec une application au ski. Son objectif est d'établir des relations entre les sensations et les paramètres de conception. Basée sur l'analyse fonctionnelle, la première étape permet de cerner et de justifier les caractéristiques sensorielles à étudier et les fonctions attendues par le client. Les sensations sont ensuite transcrites en termes appelés descripteurs, et les fonctions traduites en grandeurs physiques puis en variables de conception. La dernière étape consiste à relier ces deux familles de données.

Le QFD détaillé plus haut est également la base d'un travail, qui tente de pérenniser les caractéristiques sensorielles au long du processus de conception. En effet, si l'étape importante du QFD est d'établir les priorités dans les qualités attendues, suivre leur évolution donc interroger le consommateur par un processus dynamique semble également indispensable. Dans une étude appliquée au volant d'automobile, Crochemore & al [CRO 04] partent de l'hypothèse que la préférence du client est un compromis entre plusieurs critères

et utilisent des outils de l'analyse conjointe. Les combinaisons de critères sont étudiées plutôt que d'en isoler un. Pour reprendre l'exemple de Benavent [LIQ 01], une personne répond sans hésiter à la question "préférez-vous être beau, intelligent et en bonne santé plutôt que laid, bête et malade ?". Par contre, sa réponse devient moins catégorique si le choix lui est donné entre beau et malade ou laid et en bonne santé. Chacun trouve son compromis.

Le Kansei engineering est utilisé dans une étude appliquée aux chaussures par Mantelet & al [MAN 05] pour préciser un cahier des charges "stylistique" du produit, en tentant de corréler des descripteurs sémantiques aux paramètres de conception de la paire de chaussures. Les outils de l'analyse sensorielle et de l'analyse de données ont, eux, été utilisés [PET 04] pour définir précisément le besoin, en avoir une compréhension fine et pouvoir définir alors le cahier des charges. Pour réaliser des tests perceptifs sur des consommateurs, il faut pouvoir leur présenter des stimuli donc des produits potentiels. Certains produits étant impossible à prototyper en grand nombre ou à paramétrer, les outils de réalité virtuelle se sont imposés dans certaines méthodes orientées vers le consommateur [COR 03], cela bien sûr pour des problèmes d'esthétique et design du produit. Ainsi des tests de comparaison par paires ou de classement ont pu avoir lieu avec des produits virtuels. Cela permet également dans un second temps de trouver les règles de préférence des clients et de modéliser virtuellement la solution idéale, de la refaire tester et de la valider pour un moindre coût avant l'étape de production.

#### 1.1.4 Conclusions

Le "consommateur de masse" n'existe plus de nos jours. Les entreprises doivent adapter le produit à un client, le particulariser, le "customiser"... Plusieurs facteurs sont la cause de ces phénomènes :

- le client est de plus en plus averti, renseigné sur les produits. Les moyens de communication type internet lui permettent d'accéder aux informations sur les produits, sur la concurrence, de faire des comparatifs, de savoir ce qui est faisable ou pas ;
- le client est de plus en plus exigeant, surtout quand il dépense de l'argent, tant sur les objets que sur les services ;
- le client a un réel besoin d'identité, de ne pas être considéré comme tout le monde, il demande une individualisation du produit ;
- la concurrence est de plus en plus forte ;
- les règles économiques ne donnent plus le droit à l'erreur.

Pour minimiser le risque, donc assurer les ventes, il faut un produit qui colle à la demande du client, ou plus précisément des clients et c'est là toute la difficulté. Pour cela, prendre en compte le client dans la démarche de conception devient indispensable, comme



les différentes méthodes développées ci-dessus le présente.

Notre étude peut s'intégrer dans une méthode de Kansei Engineering car l'objectif est identique : obtenir les paramètres de conception du produit à partir des préférences du client. Par contre, elle diffère sur les outils utilisés. En effet, le Kansei Engineering met en action des processus lourds de l'intelligence artificielle, faisant intervenir de larges bases de données et procédures d'exploration. Notre étude, plus modeste, sur un produit donné, la trompette, nécessite un vocabulaire adapté mais pas une grosse structure comme le Kansei Engineering. Le principe reste cependant le même.

Pour ce travail, nous avons donc choisi la trompette : avec un produit déjà existant, l'objectif n'est pas de concevoir un produit nouveau mais d'améliorer l'existant dans le sens souhaité par les utilisateurs. Or, le langage des trompettistes et celui des scientifiques n'est pas le même et cela demande un effort d'écoute pour une compréhension fine de leurs attentes. Comme l'écrivait Goethe, *"Parler est un besoin, écouter est un art."* Grâce à des tests perceptifs et aux outils de l'analyse sensorielle, nous avons cherché à préciser la demande client tout au long de la démarche de conception pour être sûrs d'y répondre.

Dans le chapitre suivant, nous présentons en détail le produit sélectionné ainsi que les notions d'acoustique musicale nécessaires pour la compréhension de l'étude.

## 1.2 Acoustique des cuivres

Ce chapitre a pour objectif de définir ce qu'est la trompette en tant qu'instrument de musique, puis d'en décrire le fonctionnement donc de présenter la trompette en tant que système physique. Les informations, issues de la littérature, permettront au lecteur d'aborder les notions essentielles nécessaires à la bonne compréhension des chapitres 2 et 3. Pour acquérir des connaissances supplémentaires, le lecteur pourra consulter [FLE 91] ou [CAM 87] pour l'acoustique générale et [CUL 00] ou [ELI 82] pour les cuivres plus particulièrement.

### 1.2.1 Présentation du produit : la trompette

La trompette est un instrument à vent de la famille des cuivres. La caractéristique de cette famille est, certes, le matériau utilisé mais surtout la façon de produire le son : par la vibration des lèvres du musicien.

#### 1.2.1.1 Description

La trompette est constituée d'une embouchure (Figure 1.14), du corps de l'instrument et d'un pavillon. Les embouchures sont de petites cuvettes, plus ou moins larges et profondes selon l'instrument et qui communiquent avec le tuyau par une petite ouverture

[LEI 89]. La taille de l'embouchure est un facteur influent de la hauteur de jeu : plus l'embouchure est grande, plus les sons obtenus sont graves. La forme de l'embouchure influence également le timbre de l'instrument. Dans le cas de la trompette, il s'agit d'une embouchure à bassin plat qui donne un son clair, riche en harmoniques [MIC 88]. L'embouchure

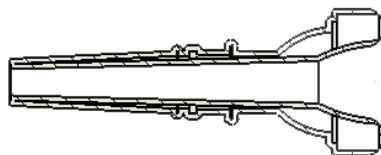


Figure 1.14: L'embouchure de trompette

fait le lien entre les lèvres du musicien et le corps de l'instrument (Figure 1.15). Celui-ci est composé d'une branche d'embouchure, de coulisses, d'un bloc piston. Le bloc central se compose de 3 pistons qui vont permettre de jouer toutes les notes de la gamme. Le pavillon quant à lui va permettre de projeter le son de façon très large.

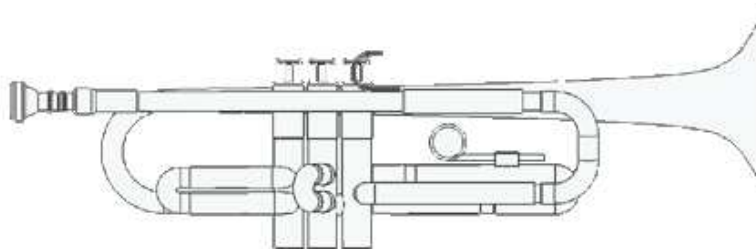


Figure 1.15: La trompette

La trompette la plus utilisée est la trompette en Sib, (c'est-à-dire que pour un Do écrit sur la partition, la note perçue est un Sib : on parle d'instrument transpositeur). Il existe également des trompettes sopranino en Mib ou ré, piccolo en Sib, alto en Fa ou Sol, et la trompette soprano qui, en plus du Sib existe en Ut.

### 1.2.1.2 La géométrie de l'instrument

La géométrie interne de la trompette, appelée la perce, est de forme complexe et peut être présentée comme l'évolution du rayon du cylindre en fonction de la distance à l'origine (embouchure).

La mesure suivante de la perce (tableau 1.1) a servi de base à notre étude. Elle a été réalisée à l'aide d'un pied à coulisse de l'extérieur du tube à laquelle a été retirée l'épaisseur des parois. La position (X) est la distance à l'entrée de l'embouchure, et D le diamètre de la perce correspondant.

Nous verrons dans les différentes étapes de fabrication de quelle manière les matériaux sont travaillés pour aboutir à ces géométries.

X en mm	D en mm	X en mm	D en mm	X en mm	D en mm
0	16	869	11.97	1176	19.69
5	3.65	904	12.41	1208	21.29
85	9.28	934	12.65	1238	23.1
140	10	963	13.3	1263	25.5
195	11	993	13.94	1299	28.75
250	11.4	1024	14.78	1329	33.4
305	11.65	1054	15.58	1363	45
800	11.65	1084	16.9	1392	69.4
820	12.25	1115	17.36	1420	122
839	12.2	1145	18.5		

Tableau 1.1: Mesure de la géométrie interne de la trompette Yamaha 1335

### 1.2.1.3 Fonctionnement d'un instrument de type cuivre

Les instruments de type cuivre comme la trompette ou le trombone font partie de la famille des instruments à vent, ce qui signifie que le musicien doit envoyer un jet d'air pour obtenir un son. Alors que les "bois" type clarinette ou hautbois possèdent une anche, pour les cuivres, c'est la vibration des lèvres du musicien ("le buzz") qui produit l'excitation de la colonne d'air. On parle d'oscillation auto-entretenu, car la "bouffée" d'air envoyée à chaque ouverture des lèvres se propage dans l'instrument et se réfléchit en partie à chaque variation externe de la géométrie [VER 00]. Cette onde réfléchie fournit l'énergie nécessaire pour entretenir l'oscillation des lèvres.

L'embouchure, posée sur les lèvres, a le rôle d'adaptateur entre les lèvres et le corps de l'instrument. Pour un même doigté, le musicien peut, en faisant varier la pression d'air, la tension des lèvres, la position de la langue, bref son "masque" [GIL 00], exciter différents modes de la colonne d'air et donc jouer plusieurs notes différentes (les partiels). Pour la trompette, un changement de note peut également être provoqué par l'enfoncement des pistons qui allonge le résonateur et modifie ses fréquences de résonance.

En position "à vide", c'est-à-dire sans piston enfoncé, le trompettiste peut jouer les harmoniques de *Sib*, soit *Sib*2, fa3, *Sib*3, ré4, fa4, *lab*4, *Sib*4 (figure 1.16).



Figure 1.16: Les harmoniques de Sib

L'abaissement d'un piston dévie la colonne d'air et rallonge la longueur totale de l'instrument d'une longueur donnée, correspondant à :

- 1/2 ton pour le piston 1 (le plus près de l'embouchure) ;
- 1 ton pour le piston 2 ;

- 1 ton  $1/2$  pour le piston 3.

En position 1, c'est-à-dire avec le piston 1 abaissé, les partiels jouables sont donc ceux de la note La (Figure 1.17).



Figure 1.17: Les harmoniques de La

Les pistons peuvent être actionnés ensemble, offrant au total 8 positions notées par le nom des pistons enfoncés. Cela permet ainsi de jouer toute les notes de la gamme. Le *Sib* à vide (0) devient La en position 1, *Lab* en position 2 (avec le piston 2 enfoncé), Sol en position 3, *Fa#* en position 13 (pistons 1 et 3 enfoncés) et ainsi de suite. Toutes les notes de la gamme chromatique peuvent donc être jouées (Tableau 1.2).

octave	Sib	Si	Do	Do#	Ré	Ré#	Mi	Fa	Fa#	Sol	Sol#	La
2	-	-	-	-	-	-	123	13	23	12	1	2
3	0	123	13	23	12	1	2	0	23	12	1	2
4	0	12	1	2	0	1	2	0	23	12	1	2

Tableau 1.2: Doigtés usuels de la trompette

On se rend compte que si le piston 1 baisse la note d' $1/2$  ton, que le 2<sup>e</sup> baisse d'un ton, alors la combinaison 12 retire 1 ton  $1/2$  à la note, ce qui est équivalent à enfoncer le piston 3. Dans la réalité, les notes produites par ces deux doigtés ne sont pas strictement identiques car les longueurs 1, 2 et 3 rajoutées par les pistons sont un compromis pour atteindre une justesse générale. L'annexe E présente une recherche d'optimisation des longueurs ajoutées des pistons, par la théorie des longueurs équivalentes.

#### 1.2.1.4 Fabrication d'une trompette

Koppe [KOP 96] décrit le processus de fabrication de la trompette en 14 étapes :

- le stockage : entreposage des matières premières classées,
- le débitage : découpage des tubes aux longueurs de l'instrument,
- le découpage : découpage des feuilles de métal pour former le pavillon,
- le perçage : perçage des trous dans les tubes "piston" et assemblage des éléments du bloc piston,
- l'étirage : formation des branches d'embouchure,
- le façonnage : pliage de la feuille de métal en forme de pavillon,
- le brasage : soudure plus robuste de la tranche du pavillon,

- le martelage : mise en forme de nombreuses pièces,
- le cintrage : action de courber les pièces,
- le montage : assemblage des différentes pièces,
- le décapage : trempage des trompettes dans plusieurs bains,
- la gravure : inscription de la marque sur l'instrument,
- l'avivage : traitement de la surface de la trompette,
- la finition : vernissage.

La trompette est donc le fruit de multiples transformations sur les différentes formes de laiton (tubes, feuilles...). L'utilisation de techniques spécifiques et le savoir-faire du concepteur sont nécessaires pour fabriquer un bon instrument. En effet, sur les modèles professionnels, les étapes faites pour des modèles d'études sur machine sont réalisées à la main et apportent donc une signature à chaque trompette.

## 1.2.2 Impédance d'entrée

### 1.2.2.1 Définition

La projection d'air dans un tube met en mouvement des particules, les molécules d'air, à une vitesse donnée, ce qui permet d'exprimer le débit d'entrée en multipliant par la surface de section du tube. Ces mouvements engendrent une variation de pression de l'air par rapport à la pression atmosphérique, pression de l'air au repos. Ces deux grandeurs sont appelées débit et pression d'entrée acoustique ( $U_e$  et  $P_e$ ) [FLE 91]. Ce rapport est appelé impédance d'entrée acoustique et est noté  $Z_e$  lorsque les signaux sont sinusoïdaux. Cette quantité est souvent utilisée divisée par l'impédance caractéristique  $Z_c = \rho c/S$ , ce qui la rend sans dimension. On l'appelle alors impédance d'entrée réduite, notée  $Z_{er}$ .

La réponse acoustique de la trompette à différentes fréquences peut donc être caractérisée par son impédance d'entrée (dans notre cas, dans le plan d'entrée de l'embouchure). Cette quantité caractéristique de l'instrument est le rapport de l'amplitude de la pression acoustique sur l'amplitude du débit acoustique (ou de la vitesse acoustique moyenne sur la section d'entrée).

$$Z_e = P_e/U_e \quad \text{et} \quad Z_{er} = Z_e/Z_c \quad (1.1)$$

Lorsque ce rapport à l'entrée de l'instrument exhibe un maximum d'amplitude à une fréquence donnée, on parle de fréquence de résonance. Le tracé des courbes d'impédance d'entrée (Figure 1.18) fait donc apparaître l'ensemble des fréquences de résonance pour un instrument donné.

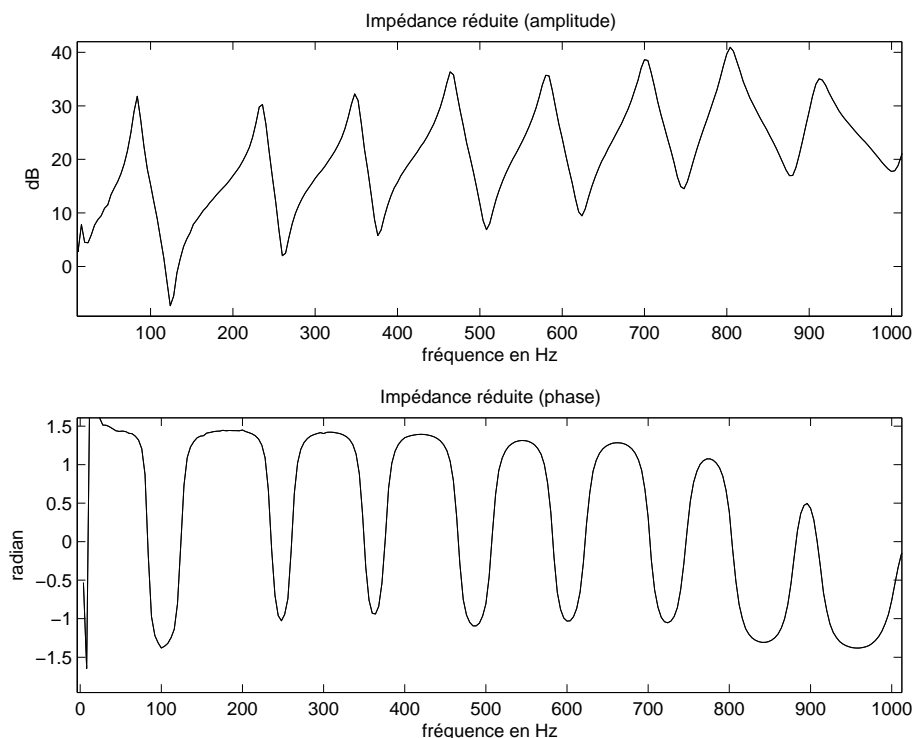


Figure 1.18: Courbe de l'impédance d'entrée réduite, amplitude et phase, mesurée sur une trompette "à vide"

L'impédance est caractéristique de la perce de l'instrument, c'est-à-dire de sa géométrie interne.

Pour obtenir ces courbes, deux possibilités existent : la mesure ou le calcul. Nous allons par la suite expliquer cela, en détaillant deux dispositifs de mesures utilisés puis la méthode de calcul exploitée.

### 1.2.2.2 Les mesures d'impédance

Il existe plusieurs systèmes de mesure d'impédance : ces systèmes peuvent être expérimentaux (en laboratoire) ou commercialisés. Nous nous sommes intéressés à deux d'entre eux. Le premier, expérimental, est le pont d'impédance et le deuxième, commercialisé, est le système BIAS.

#### a - Le pont d'impédance

Le pont de mesures d'impédance a été développé par Dalmont ([DAL 01a],[DAL 01b]) et Bruneau [DAL 92]. La trompette est fixée hermétiquement par l'embouchure à deux microphones (Figure 1.19). Le premier (utilisé en source sonore) a pour rôle de générer une onde sinusoïdale de fréquence bien définie pour exciter la colonne d'air de la trompette. Cette source balaye graduellement (pas de 1Hz pour des mesures précises) la plage fréquentielle demandée. Pour avoir un ordre d'idée, nos mesures ont été effectuées pour les simulations sur une plage de 4 à 8192Hz par pas de 4 Hz et pour l'estimation des

paramètres des résonances acoustiques, de 50 à 1500Hz par pas de 1 Hz. La réponse fréquentielle, donc l'impédance d'entrée acoustique est recueillie par le deuxième microphone. Le dispositif est placé en chambre sourde.

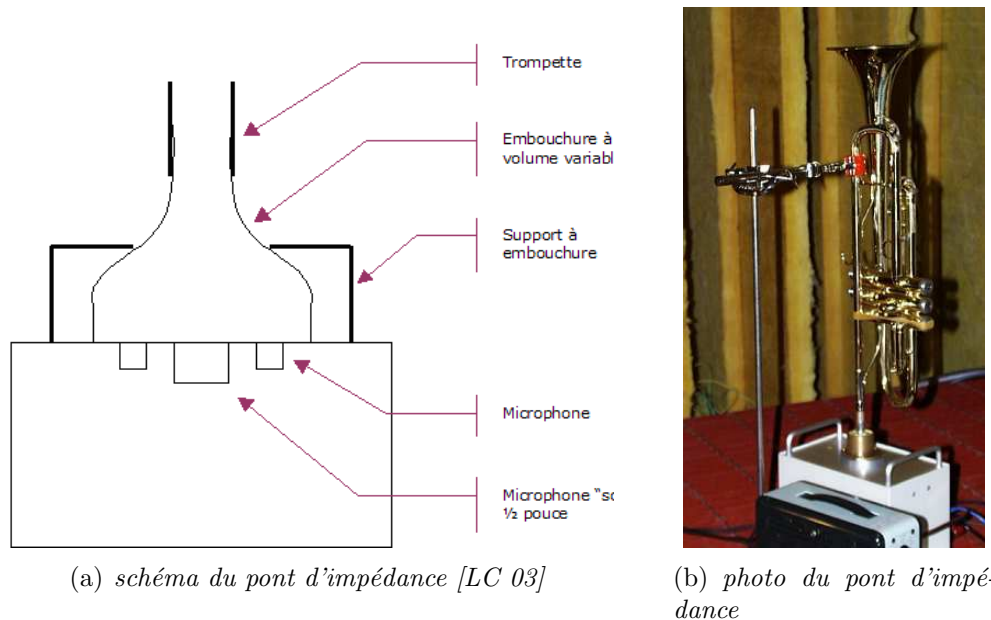


Figure 1.19: Le pont d'impédance

### b - Le système BIAS

Le système BIAS développé par l'Institut für Wiener Klangstil (IWK), est un outil d'aide à la conception d'instruments de musique dont une des fonctions principales est de mesurer l'impédance d'entrée des instruments. Il est constitué d'une tête d'impédance (Figure 1.20) reliée via un port USB à un ordinateur, dont le logiciel installé permet de piloter la tête d'impédance [DUR 04].

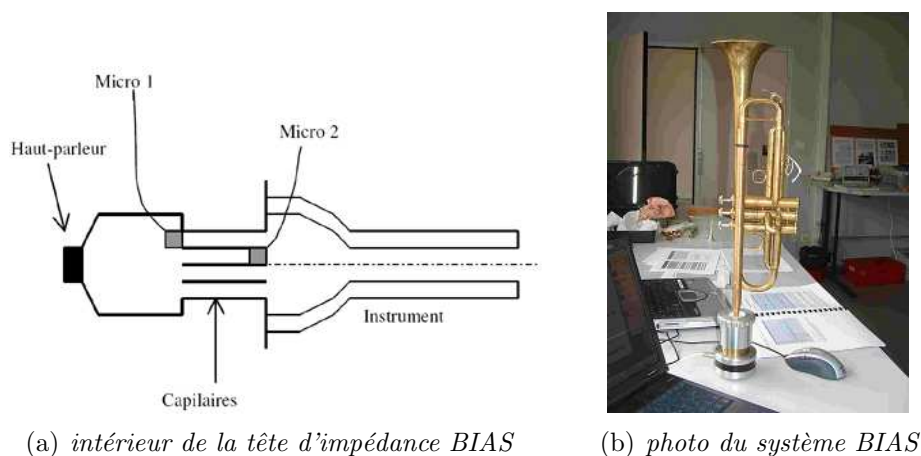


Figure 1.20: Le dispositif BIAS

### 1.2.2.3 Calcul d'impédance

Après avoir cité les dispositifs de mesure d'impédance, nous nous intéressons au calcul d'impédance. Les mesures sont assez fastidieuses à mettre en place, ce qui donne au calcul un très grand intérêt. Par la définition de la perce et grâce à la modélisation par ligne de transmission dans notre cas, l'impédance d'entrée peut être approchée.

#### La modélisation par ligne de transmission

Pour pouvoir calculer l'impédance d'entrée à partir de la perce de l'instrument, la modélisation par ligne de transmission semble être la méthode la mieux adaptée, étant un bon compromis entre une méthode plus complexe type éléments finis, très gourmande en ressources informatiques, et un modèle d'équivalent électrique simple, de résultats peu précis.

Pour chaque élément (cylindre ou cône), la matrice de transmission entre la pression et le débit d'entrée ( $P_e, U_e$ ) et la pression et le débit de sortie ( $P_s, U_s$ ) sont utilisées. Nous cherchons  $H_{11}, H_{12}, H_{21}$  et  $H_{22}$  tels que :

$$\begin{bmatrix} P_e \\ U_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_s \\ U_s \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

H est appelée matrice de transmission ou de transfert de l'élément considéré.

Pour une portion de cylindre, la matrice de transmission H est :

$$H = \begin{bmatrix} \cos kL & jZ_c \sin kL \\ jZ_c^{-1} \sin kL & \cos kL \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

avec  $k = \omega/c$ ,  $c$  la vitesse du son,  $\omega$  la fréquence angulaire et  $L$  la longueur du segment.

Pour une portion de cône (Figure 1.21), la matrice devient :

$$H = \begin{bmatrix} (\cos kL - \frac{\sin kL}{kL'})C & jZ_{cm} \sin kL \\ \frac{j}{Z_{cm}} (\sin kL (1 + \frac{1}{k^2 L' l}) + \cos kL (\frac{1}{kL'} - \frac{1}{kl})) & (\cos kL + \frac{\sin kL}{kl})C^{-1} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

avec  $Z_{cm} = \frac{\rho c}{\sqrt{S_1 S_2}}$ ,  $S_1$  et  $S_2$  les sections d'entrée et de sortie du cône,  $C = \sqrt{S_2/S_1}$ ,  $l = L/C$  et  $L' = L + l$  [NOR 03].

La géométrie de la trompette peut être représentée par une suite de tranches élémentaires, cylindre et cône, (Figure 1.22), caractérisées par leur position et leur(s) rayons.

Cette matrice de transfert doit être calculée pour chacun des  $N$  éléments de la géométrie ( $H^i$ ,  $i$  de 1 à  $N$ ) afin de déduire la matrice de transmission de la trompette complète par multiplication des matrices, suivant impérativement l'ordre de la série de portions



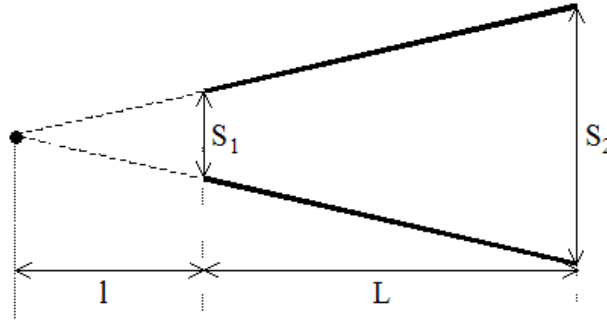


Figure 1.21: Schéma du cône et de ses paramètres

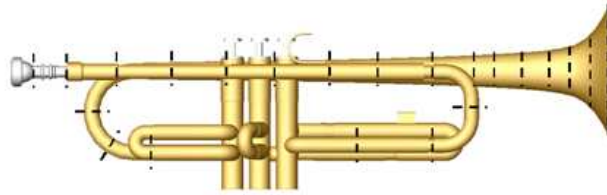


Figure 1.22: Découpage de la trompette en portions de cylindre et de cônes

élémentaires [NOR 03]:

$$H = H^1 H^2 H^3 \dots H^N \quad (1.5)$$

L'impédance d'entrée  $Z_e$  donnée par le rapport  $P_e/U_e$  se déduit donc de l'équation 1.5.

$$Z_e = \frac{P_e}{U_e} = \frac{H_{11}P_s + H_{12}U_s}{H_{21}P_s + H_{22}U_s} \quad (1.6)$$

$$Z_e = \frac{H_{11}Z_r + H_{12}}{H_{21}Z_r + H_{22}} \quad \text{avec } Z_r = P_s/U_s \text{ l'impédance de rayonnement}$$

Ce calcul présente un très grand intérêt puisqu'il permet de générer les courbes d'impédance pour des instruments de géométrie variable et de contrôler les effets de ces changements de géométrie sur les fréquences de résonance. Pour contrôler ces évolutions, plusieurs paramètres sont issus de la courbe d'impédance.

#### 1.2.2.4 Paramètres issus de la courbe d'impédance

Une courbe d'impédance d'entrée de la trompette utilisée en doigté "à vide" (Figure 1.18) fait apparaître une dizaine de fréquences de résonance, fréquences pour lesquelles l'amplitude de l'impédance d'entrée est localement maximum, la phase passant par zéro. Nous avons relevé sur les courbes, en repérant les changements de pente, les 10 premières fréquences de résonance, notées  $f_{resi}$  avec  $i$  allant de 1 à 10.

Chaque pic d'impédance est donc caractérisé par sa fréquence mais également par son amplitude et noté  $|Z_i|$ . Elle peut être relevée directement sur la courbe également (Figure 1.23).

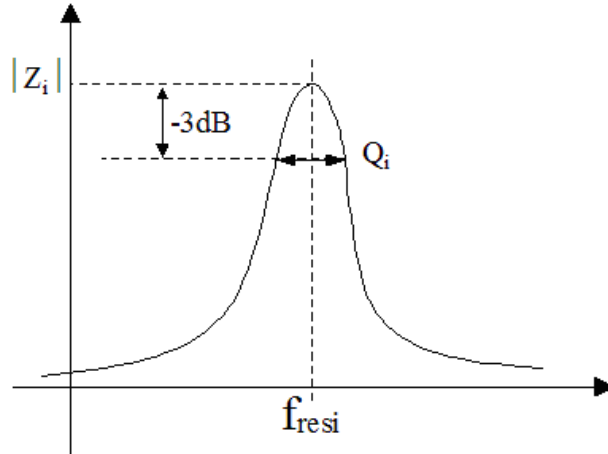


Figure 1.23: Paramètres issus de la courbe d'impédance :  $f_{resi}$ ,  $|Z_i|$ ,  $Q_i$

Le dernier indice que nous avons choisi d'étudier est le facteur de qualité noté  $Q_i$ . Ce facteur permet de caractériser la finesse des pics de la courbe d'impédance. Le facteur de qualité est la largeur du pic 3dB en-dessous de son maximum : c'est la largeur de fréquence à une bande passante -3dB. D'après certains auteurs comme Benade [BEN 76], il aurait les vertus de prédire si l'instrument est facile à jouer sur ces pics. En effet, plus la résonance serait fine donc plus  $Q$  serait élevé, plus la trompette serait facile à jouer à cet endroit. Inversement, plus le pic serait évasé, plus le son serait étouffé.

### 1.2.3 Cuivres en situation de jeu

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté l'instrument seul. Pour mesurer l'impédance de l'instrument, un signal sinusoïdal excite la colonne d'air et la mesure est réalisée sur le signal réfléchi dans l'instrument : il réagit en oscillations forcées. Le deuxième cas d'étude d'un cuivre est lorsqu'il est en situation de jeu. Il s'agit alors d'un couplage instrument-musicien qui permet d'auto-entretenir les oscillations de la colonne d'air. C'est cette deuxième situation qui va être décrite dans ce nouveau chapitre. Nous présenterons la trompette en "situation de jeu" réel, c'est-à-dire couplée à un excitateur humain (musicien) ou mécanique (bouche artificielle), et virtuel dans le cas des simulations numériques.

#### 1.2.3.1 Bouche Artificielle

Le caractère répétable des enregistrements et des mesures est une des qualités premières attendues. Or, lorsque le trompettiste joue, il est impossible de contrôler la position de sa langue, l'ouverture de sa gorge, sa fatigue et tant d'autres paramètres. Même si l'intention est la même, la mesure ne sera pas identique. Pour s'affranchir de cette difficulté, plusieurs modèles de bouches artificielles ont été développés ([GIL 02]). Le principe est de mettre en vibration des lèvres artificielles par un jet d'air, pour reproduire le "buzz" de

l'instrumentiste.

La fonction principale d'un tel dispositif est de jouer plusieurs notes de la tessiture de l'instrument de façon stable. Cela implique de pouvoir modifier les paramètres du masque, c'est-à-dire la tension des lèvres, la force d'appui sur l'embouchure, la pression d'air en entrée. Pour cela, de petits tubes en latex remplis d'eau font figure de lèvres artificielles. La bouche artificielle permet de contrôler les paramètres suivants :

- la tension des lèvres, de deux manières : par une seringue permettant d'ajouter ou de retirer de petites quantités d'eau dans les tubes en latex, ou bien par une bague, réglant la pression d'une machoire artificielle appliquée sur les lèvres,
- la pression de l'embouchure sur les lèvres, le contact pouvant être plus ou moins forcé par une bague réglable,
- le débit d'air en entrée de l'instrument contrôlé par un levier.

La figure 1.24 présente le dispositif de la bouche artificielle pour cuivre.



Figure 1.24: Bouche artificielle pour cuivre

### 1.2.3.2 Modèles physiques et simulations

Simuler se définit comme "faire paraître réel ce qui ne l'est pas". Dans notre application aux sons, c'est faire jouer un instrument physiquement absent voire inexistant. Leur utilisation est répandue en synthèse sonore. Citons par exemple Msallam[MSA 98] ou Vergez [VER 00]. Mais les simulations numériques correspondent également à une recherche de solutions approchées d'un système d'équations, appelé modèle physique ([ELI 82], [CUL 00]), décrivant le cuivre en situation de jeu. Elles ont donc aussi pour objectif d'aider à la compréhension du fonctionnement d'un instrument de musique. Finalement, nous voulons montrer par cette étude que les simulations peuvent devenir un très bon

outil d'aide à la facture. Avant de parler de la méthode de simulation en elle-même, nous présenterons tout d'abord le modèle physique utilisé pour décrire la trompette.

### Le modèle physique

Le modèle physique de la trompette est composé d'un système de 3 équations qui permettent d'obtenir la pression à l'entrée de l'instrument, auquel on adjoint une quatrième équation représentant la propagation du son à l'extérieur de l'instrument. La première équation du système modélise la mécanique des lèvres (effet valve), la seconde l'écoulement de l'air et la troisième l'acoustique du résonateur. Détaillons à présent ce système.

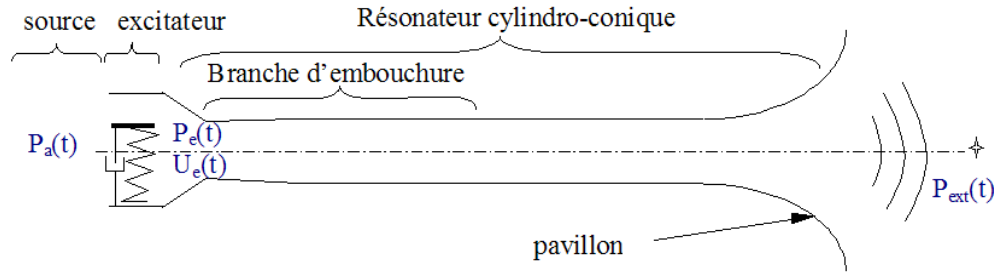


Figure 1.25: Schéma du fonctionnement de la trompette

Le trompettiste envoie dans l'instrument un jet d'air, conséquence d'une pression  $P_a(t)$  dans sa bouche (figure 1.25). Cet air déstabilise les lèvres du musicien qui jouent le rôle de valve, modulant le débit d'air  $u_e$  entrant dans l'embouchure en fonction de l'ouverture des lèvres notée  $h(t)$ . Ces lèvres peuvent être modélisées mécaniquement par un oscillateur à un degré de liberté, un système masse-ressort-amortissement (figure 1.26), caractérisé par l'équation 1.7 déduite du principe fondamental de la dynamique.

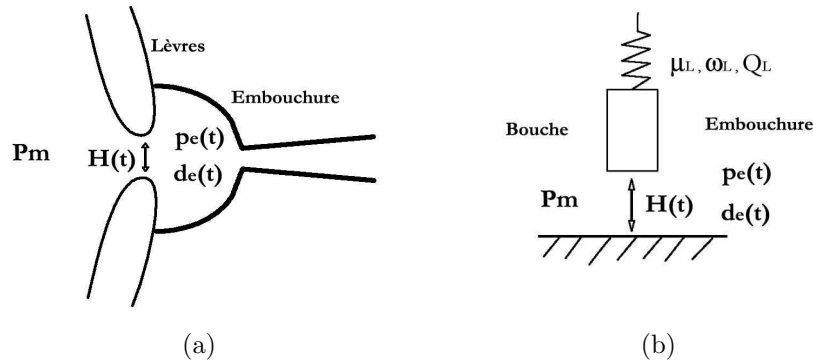


Figure 1.26: Modélisation des lèvres par un modèle "à une masse", d'après Cullen [CUL 00]. (a) Représentation schématisée des lèvres d'un instrumentiste et de l'embouchure; (b) Modèle à une masse équivalent.

$$\frac{d^2}{dt^2}h(t) + \frac{\omega_L}{Q_L} \cdot \frac{d}{dt}h(t) + \omega_L^2 h(t) = \frac{P_a(t) - p_e(t)}{\mu_L} \quad (1.7)$$

Cette équation peut également être présentée dans le domaine fréquentiel sous la forme 1.8.

$$H(j\omega) = -\frac{1}{\mu(-\omega^2 + \omega_L^2 + j\frac{\omega_L}{Q_L}\omega)} \cdot P_e(j\omega) \quad (1.8)$$

Le musicien forme donc un jet d'air en sortie des lèvres. Le débit de ce jet  $u_e$  s'exprime sous la forme [ELI 82] :

$$u_e(t) = b \cdot h(t) \cdot \text{sign}(P_a - p_e(t)) \sqrt{\frac{2|P_a - p_e(t)|}{\rho_{air}}}, \quad (1.9)$$

où  $b$  est la largeur de l'ouverture des lèvres,  $\rho_{air}$  est la masse volumique de l'air. Cette relation est non linéaire et ne peut donc pas s'exprimer dans le domaine fréquentiel.

Comme vu précédemment, la caractéristique physique d'un instrument est son impédance d'entrée ( $Z_e$ ), qui peut être mesurée ou calculée. Elle est définie comme le rapport de la pression d'entrée ( $P_e$ ) sur le débit acoustique entrant ( $U_e$ ) en régime sinusoïdal de pulsation  $\omega$ .

$$P_e(j\omega) = Z_e(j\omega) \cdot U_e(j\omega) \quad (1.10)$$

Le corps de l'instrument se comporte comme un filtre passe-haut. Pour obtenir la pression  $P_{ext}$ , à l'extérieur de l'instrument, la pression d'entrée  $P_e$  est multipliée par une fonction de transfert de type "passe-haut"  $H_{ext}(j\omega)$ .

$$P_{ext}(j\omega) = H_{ext}(j\omega) \cdot P_e(j\omega), \quad (1.11)$$

ou dans le domaine temporel,

$$p_{ext}(t) = g_{ext}(t) * p_e(t) \quad (1.12)$$

avec  $g_{ext}(t)$  la réponse impulsionnelle associée à  $H_{ext}(j\omega)$ .

Le modèle d'oscillation des lèvres est donc défini par 3 équations. L'oscillateur et le résonateur sont décrits par deux équations linéaires (équations 1.7, 1.10). Le couplage est réalisé par l'écoulement d'air, et est décrit par une équation non linéaire (équation 1.9). La résolution de ce système donne la pression acoustique  $p_e(t)$  dans l'embouchure de l'instrument. Une quatrième équation permet de fournir la pression à l'extérieur de l'instrument (équation 1.11).

### 1.2.3.2.1 Les simulations

Le principe des simulations est illustré par la figure 1.27.

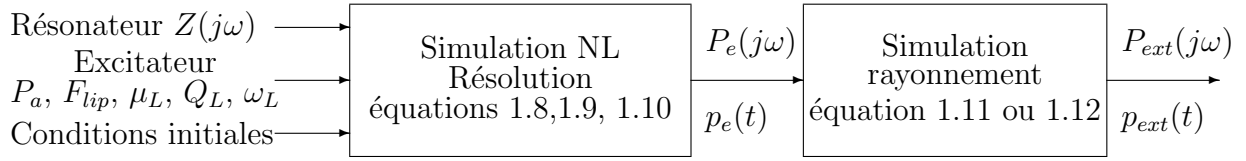


Figure 1.27: Synoptique de la démarche globale des simulations

La première étape est de trouver  $p_e$  puis d'en déduire  $p_{ext}$ . Si le bloc simulation linéaire peut être modélisé de façon simple par un filtre passe-haut, le modèle physique est beaucoup moins facile à solutionner. Deux choix de simulations se présentent pour le domaine d'étude : temporel ou fréquentiel. La méthode choisie dans notre étude est celle de l'équilibrage harmonique, qui opère dans le domaine fréquentiel.

Le système est composé de 3 équations (1.8, 1.9 et 1.10) à 3 inconnues ( $P_e$ ,  $H_e$  et  $U_e$ ). La non linéarité de l'équation 1.9 implique une recherche de solutions approchées et non analytiques.

La situation à étudier est celle du jeu de l'instrument en régime permanent, sans s'occuper des transitoires d'attaque et d'extinction. Ce régime permanent implique la recherche de solutions périodiques, d'où la décomposition de  $p_e$ ,  $h_e$  et  $u_e$  en série de Fourier tronquée à N harmoniques :

$$p_e(t) = \sum_{n=1}^N P_n \cos(n2\pi F_{jeu}t + \phi_n), \quad (1.13)$$

$$u_e(t) = \sum_{n=1}^N U_n \cos(n2\pi F_{jeu}t + \psi_n), \quad (1.14)$$

$$h(t) = \sum_{n=1}^N H_n \cos(n2\pi F_{jeu}t + \epsilon_n). \quad (1.15)$$

Chercher  $P_e$  revient alors à chercher les  $F_{jeu}$ , les  $P_n$  et les  $\phi_n$  pour un nombre fini d'harmoniques N. Les équations linéaires vont donc être traitées dans le domaine fréquentiel, harmonique par harmonique. Le principe de l'équilibrage harmonique [GIL 89] est de proposer un vecteur  $\vec{X}$ , vecteur des harmoniques composé de  $[P_n, \phi_n, F_{jeu}]$ . Grâce à l'équation 1.8,  $H_N$  peut alors être calculé. Il faut ensuite repasser dans le domaine temporel pour résoudre, grâce à  $h(t)$  et  $p_e(t)$  l'équation 1.9 et obtenir  $u_e(t)$ . La transformée de Fourier nous donne  $U_N$  et permet de résoudre l'équation 1.10 et obtenir  $P_N$ , donc, un nouveau vecteur  $\vec{X}^1$ . Une différence nulle entre  $\vec{X}$  et  $\vec{X}^1$  signifie qu'il y a équilibrage har-

monique et  $P_N$  devient solution du système. Dans le cas inverse, un incrément dépendant de cette différence est calculé et la boucle réitérée. Cette méthode est résumée dans la figure 1.28.

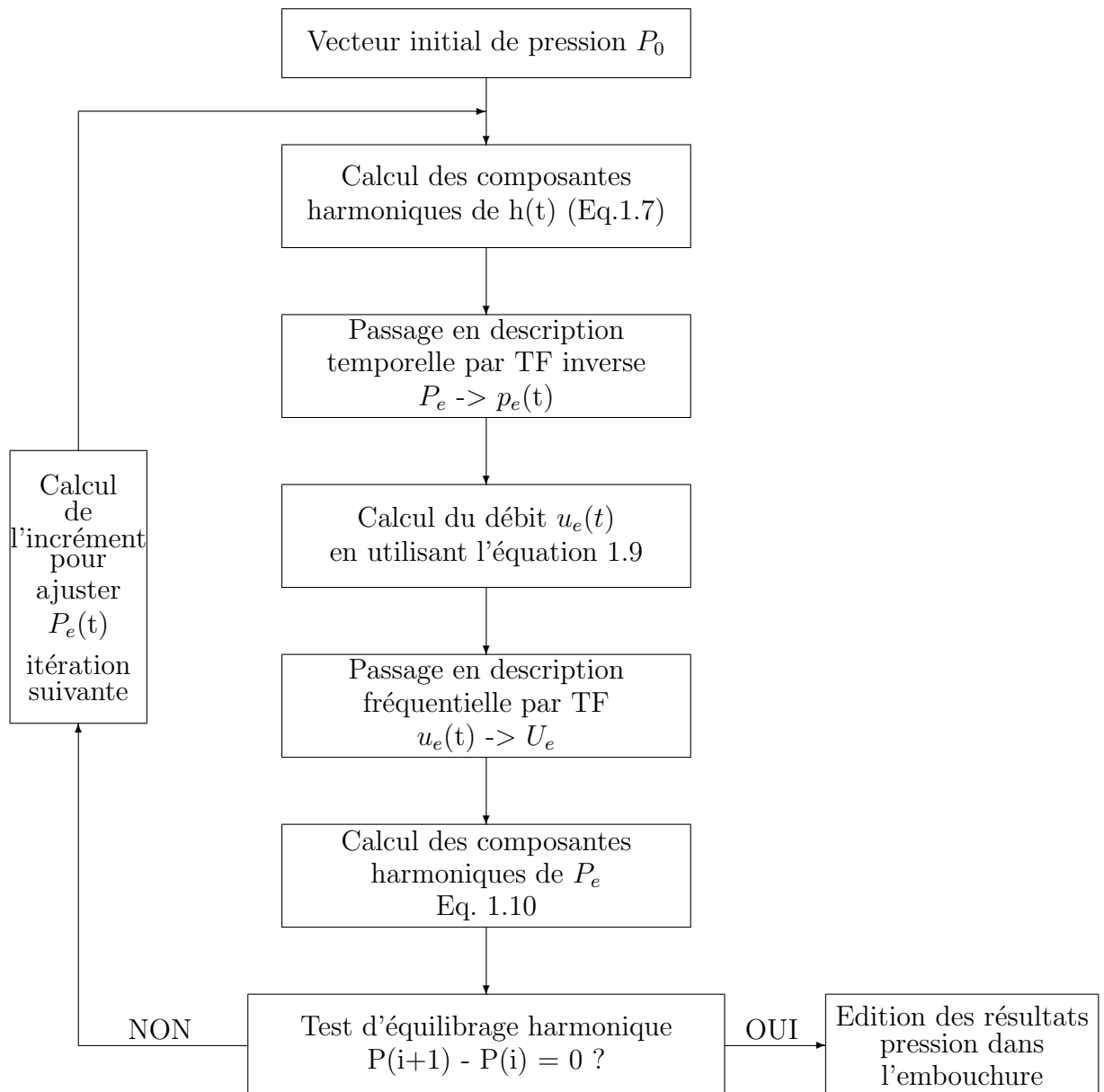


Figure 1.28: Organigramme de la méthode d'Équilibrage Harmonique

L'équilibrage harmonique permet de trouver des solutions approchées  $P_e(t)$  au modèle physique et d'obtenir après filtrage des sons à l'extérieur de l'instrument  $P_{ext}(t)$ . L'impédance est caractéristique de chaque instrument et un paramètre d'entrée des simulations. L'objectif poursuivi est de savoir si les simulations peuvent mettre en avant des différences entre instruments, comme un outil de réalité virtuelle.

De toutes ces méthodes de production des sons, que ce soit par un musicien, grâce à la bouche artificielle ou par simulation, le résultat est un signal sonore. Pour pouvoir

comparer deux signaux, nous avons choisi des paramètres issus de ce signal.

### 1.2.3.3 Paramètres extraits du signal

Le premier paramètre qui peut être extrait du signal est la fréquence de jeu. Elle est notée  $f_{jeu}$ . Précisons ici que nous parlons de la fréquence de jeu et nullement du pitch de la note qui est la hauteur perçue par l'auditeur. Deux notes peuvent avoir la même fréquence de jeu et être perçues comme différentes sur une échelle de pitch.

Le deuxième paramètre retenu est le centre de gravité spectral (CGS). Ce paramètre, souvent utilisé dans la littérature, expliquerait une des dimensions du timbre [GRE 78], plus particulièrement l'attribut "brillance" [KRI 93], attribut phare de l'étude présentée au chapitre 3. Le CGS est le centre de gravité du spectre dans une fenêtre donnée. Il est défini pour des sons stables et périodiques, selon la formule suivante :

$$CGS = \frac{\sum_{k=1}^N k \cdot A_k}{\sum_{k=1}^N A_k} \quad (1.16)$$

où  $A_k$  représente l'amplitude du partiel  $k$  du spectre et  $N$  le nombre de partiels considérés.

Le dernier paramètre du signal utilisé est l'intensité efficace, notée  $I_{RMS}$ . RMS signifie Root Mean Square. L'intensité RMS est donc la valeur quadratique moyenne du signal. Nous l'utiliserons pour équilibrer les signaux.

## 1.3 Qualité des instruments de musique et conception

La qualité sonore est devenue un axe de recherche important dans l'industrie. Plus qu'une simple mesure de niveau sonore avec un sonomètre, il est nécessaire d'étudier le niveau perçu, les images que génèrent les bruits quotidiens et la gêne provoquée. Un son assez fort n'est pas automatiquement considéré comme une nuisance sonore : cela dépend de l'endroit où il se trouve, de la fonction à laquelle il répond et du sens sémantique qu'il possède. Si l'on prend le cas des appareils ménagers, un robot ou un aspirateur [GUY 96] qui ne ferait que ronronner doucement renverrait une image d'inefficacité. Le bruit renseigne sur le fonctionnement de l'appareil. Dans l'automobile, il est souvent demandé d'atténuer le plus possible tout les bruits pour le confort des occupants du véhicule. Cependant, le bruit de fermeture d'une portière est un indice de confiance : plus il est élevé, plus le véhicule semble robuste. Il est donc nécessaire d'étudier les relations entre les mesures physiques du son et la perception de qualité des clients. Sköld et al [SKö 05] étudient la caractérisation du bruit perçu dans un compartiment de train en utilisant des



tests perceptifs puis en reliant les résultats aux paramètres du signal.

S'il y a un domaine où le son joue un rôle prépondérant, c'est bien celui de la musique, et en particulier des instruments de musique <sup>1</sup>. Les instruments sont fabriqués par des facteurs (fabrication), aidés des physiciens (recherche et développement) et utilisés par des musiciens (Figure 1.29), et éventuellement des compositeurs. Pour comprendre les attentes des musiciens, un dialogue entre fabricant et utilisateur est nécessaire.

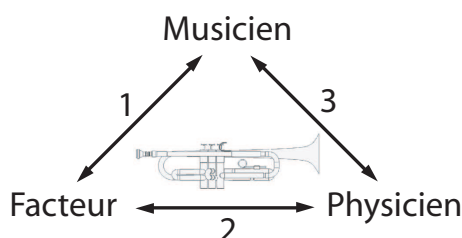


Figure 1.29: Les principaux acteurs de la fabrication d'un instrument

Chacun a son propre langage et ses propres méthodes de travail.

### 1.3.1 La relation musicien - facteur

Le musicien, donc l'utilisateur de l'instrument, est la personne à satisfaire. Avec ses propres termes, il critique, donne des axes d'amélioration et propose des pistes de solutions intuitives. Le facteur est la personne qui fabrique les instruments mais également qui accorde, répare, entretient et vend. Il est donc en contact avec le client et reçoit ses retours. Il a donc un contact privilégié avec les musiciens qui lui permettent de comprendre pourquoi tel ou tel instrument est vendu ou non.

Le deuxième contact entre le musicien et le fabricant est celui de l'essayeur dans les grandes firmes. Son niveau musical est élevé mais la sélection d'un essayeur se fait majoritairement sur sa capacité à exprimer ses sensations et à indiquer la direction vers laquelle il faut orienter les recherches. Son rôle est de tester les instruments de différentes séries, de repérer les rares "erreurs" de fabrication et de donner son avis par rapport à la population-cible visée par l'instrument. Des musiciens de grand renom jouent ce rôle dans les entreprises, autant pour leur qualité d'essayeur que pour l'image qu'ils donnent à l'instrument. Mais cela n'empêche pas le fabricant d'avoir des contacts avec des musiciens de l'extérieur, qui peuvent également amener leur pierre à l'édifice. Dans [KOP 96], Jacques Gaudet, PDG de Courtois explique son partenariat avec des brass bands suisses et anglais "qui nous envoient des rapports d'essais importants et détaillés. Nous faisons évoluer nos produits en suivant leurs indications, de l'embouchure au pavillon".

<sup>1</sup>Nous avons décidé de nous focaliser sur la qualité "sonore" ou "tonale" des instruments de musique. Notons cependant que la qualité n'est pas uniquement sonore. Elle s'exprime également en terme de "jouabilité", domaine non étudié dans ce document.

Claude Delangle parlant de son travail chez Selmer : "Mon travail d'essayeur, c'est 15 ans de questions sur l'instrument idéal qui, de toute façon, n'existe pas. Alors, il faut tendre vers le bon équilibre des paramètres : la richesse du son, la justesse, l'ergonomie, l'esthétique, tout en ayant conscience des contingences de la production et du marché. C'est un véritable travail d'équipe avec les concepteurs maison et les autres essayeurs." [DEL 04]

L'étape importante de cette relation est donc la communication. Un instrument est proposé. Il est testé et critiqué. S'il est satisfaisant, la série sort sur le marché. Sinon, l'essayeur explique les manques ou insuffisances de l'instrument aux concepteurs, qui prennent en compte ces remarques pour l'améliorer. Le problème qui se pose est qu'il est difficile de prédire, sans outil adapté, l'amélioration de l'instrument. C'est là que le physicien peut intervenir.

### 1.3.2 La relation facteur - physicien

Les facteurs sont généralement "traditionnalistes". Leur culture et leur savoir-faire reposent d'une part sur leur formation (travail des matériaux, acoustique, mécanique) et d'autre part sur leur culture et sur les apprentissages suivis avec les "maîtres" du domaine. Héritiers d'une longue tradition, les facteurs ont comme principal gage de qualité leur expérience. Le fait d'être au contact des musiciens est très enrichissant car, étant sans cesse à la recherche de perfectionnement de ses instruments, le facteur apprend à interpréter leurs demandes. Cependant, mis à part dans les grandes entreprises, les facteurs ne peuvent tester leurs modifications ou innovations que par un prototype, souvent cher, ce qui les contraint à limiter le risque donc à ne pas trop s'éloigner de l'existant.

Pour pouvoir innover et tester leurs intuitions artistiques, les facteurs ont besoin d'outils, qui sont fournis par les physiciens. Citons deux exemples : le système BIAS [WID ] et le logiciel Resonans [IRC ]. Le logiciel de calcul Resonans est un produit original qui permet au facteur de prévoir des caractéristiques de l'instrument à vent avant réalisation, en fonction de sa géométrie interne, sa perce. Resonans permet de calculer d'une part l'impédance d'entrée en fonction de la fréquence, et d'autre part les profils de pression et de débit acoustiques à une fréquence donnée. Les données nécessaires sont les caractéristiques géométriques précises de l'instrument à vent (perce longitudinale, dimension et position des trous latéraux et de ses doigtés). Le calcul des fréquences de résonance et de la courbe d'impédance d'entrée, véritable signature acoustique de l'instrument, est utile pour la conception de modifications, et peut ainsi faire gagner un temps considérable dans le processus d'élaboration de l'instrument. Ainsi l'utilisateur peut comprendre rapidement et précisément comment les fréquences de résonance sont perturbées par telle ou telle modification, sans avoir à fabriquer un prototype.

Le système BIAS permet de calculer ou de mesurer l'impédance d'entrée des instru-

ments de type cuivre comme le cor ou la trompette par exemple. Il permet ensuite de voir le résultat de modifications de la géométrie sur la courbe d'impédance. Il est aussi un outil d'optimisation.

Le troisième axe d'étude d'outils d'aide à la conception est la simulation par modèle physique présentée dans le chapitre précédent. Associées à une interface conviviale et accessible à des non scientifiques, les simulations pourraient permettre d'entendre un instrument avant de le construire et d'analyser l'influence de changements de paramètres de conception sur le son produit. Mais, même si des sons de synthèse existent et donnent des résultats perceptivement convaincants [VER 00], elles ne sont pas à ce jour assez fiables pour se poser comme réel outil d'aide à la conception.

### 1.3.3 La relation physicien - musicien

Scientifique et souvent musicien amateur, le physicien s'applique à comprendre le fonctionnement des instruments de musique, pour faire avancer les connaissances et pouvoir aider les luthiers dans leur démarche d'innovation. Pour cela, il doit comprendre le fonctionnement de l'instrument et également les attentes des musiciens. Or, il n'est d'une part pas facile de capter les préférences, et d'autre part de trouver la relation avec les très nombreux paramètres de conception d'un instrument. Dans ce domaine, plusieurs études ont été menées, tentant de relier des données subjectives à des données objectives comme des paramètres du signal, de l'impédance ou même directement de la géométrie. Certaines d'entre elles sont résumées ci-après.

#### 1.3.3.1 Données subjectives et Géométrie

Le travail de Thoreton [THO 95] concernant l'évaluation de trompettes se situe sur deux volets. D'un côté des tests subjectifs : 6 trompettistes professionnels et 2 amateurs ont réalisé une épreuve de comparaisons par paires. Chaque musicien, ganté et les yeux bandés évaluait la différence entre deux trompettes sur une échelle de 0 à 10, sans indiquer leur préférence. Cette étude subjective complète de dissimilarité a permis, en utilisant la méthode MDS (Multi Dimensional Scaling), de trouver les dimensions perceptives de l'ensemble de trompettes haut de gamme. Trois dimensions ont donc été définies pour représenter la famille de trompettes. Les trompettistes pouvaient dans un deuxième temps s'exprimer sur les qualités et défauts des instruments. Ces commentaires ont permis de relier, bien que complètement empiriquement, les notions musicales de "rondeur du son", "touche" et "facilité de jeu" aux dimensions respectivement 1,2 et 3 du plan perceptif et d'obtenir un classement des trompettes sur ces axes. D'un autre côté, des mesures d'impédance et de la géométrie de la trompette (dimension de la branche et du pavillon) ont été réalisées pour tenter de relier des indices objectifs aux positions dans l'espace des perceptions. Les coefficients de corrélations trouvés ne sont pas très satisfaisants. Les corrélations

proposées en un pour un, c'est-à-dire pour tenter de relier un élément de la géométrie avec un attribut sensoriel, semblent trop simples pour représenter la complexité de la réalité. Il faut expliquer ce résultat mitigé par le fait que l'épreuve demandée, sans formation au préalable, est totalement nouvelle et difficile pour les musiciens, même professionnels. D'un point de vue méthodologique, les mauvaises corrélations peuvent être dûes au fait que chaque trompettiste utilisait sa propre embouchure. L'instrument est alors modifié et sa courbe d'impédance également. Bien que fastidieuse, une mesure de chaque combinaison embouchure-trompette aurait été intéressante. Cependant, cette étude garde un caractère original, les tests sur les instruments joués étant rares.

Vouloir corréler la géométrie de l'instrument avec les perceptions est très ambitieux car les liens ne sont ni linéaires, ni monotones. C'est bien sûr un objectif à atteindre pour satisfaire les facteurs, à long terme, mais, il semble qu'une étape intermédiaire soit nécessaire, en passant par le signal par exemple.

### 1.3.3.2 Données subjectives et Signal

Quelques études, notamment en acoustique des salles, explorent les corrélations des perceptions humaines avec les paramètres du signal. Concernant les instruments de musique, Carral [CAR 02] propose trois méthodes de synthèse de sons de trombones, pour mesurer l'influence de certains paramètres sur la perception. Pour valider le choix de l'une d'entre elle, un test perceptif de comparaison par paires a été mené avec des sons réels et des sons de synthèse. La méthode sélectionnée a été celle dont l'indice de différenciation des sons entre synthèse et naturel était proche du hasard (0.5 en comparaison par paires). Ces sons de synthèse ont été utilisés dans la suite du travail pour étudier le seuil de différenciation de deux sons par rapport à la différence d'enveloppe spectrale. Deux tests perceptifs ont été mis en place, en paramétrant les amplitudes des partiels pour que la différence entre les enveloppes soit graduée. Ce seuil a été détecté entre 4 et 8dB de différence d'amplitude entre les partiels des signaux comparés. Ces tests ont été reproduits avec des sons enregistrés générés à partir de deux embouchures, l'une étant très légèrement modifiée (5% du diamètre de la queue). Il s'avère que les sons sont également distingués. Cette étude fait le lien entre les différences perçues et les paramètres du signal (enveloppe spectrale). Le deuxième seuil de différenciation est d'un paramètre physique de l'instrument (diamètre embouchure) par rapport aux différences perçues. Même s'il est connu que l'embouchure joue un rôle prépondérant dans la production du son, le lien entre le changement du diamètre de l'embouchure et l'évolution de l'enveloppe spectrale n'est pas évident. Le constat n'étant fait ici que sur un seul instrument, une généralisation reste à faire.

Ce lien Signal - géométrie (Figure 1.30) a été exploré par Busson [BUS 02] sur les pianos. Une verbalisation libre sur un ensemble d'instruments, associée à un tri libre a

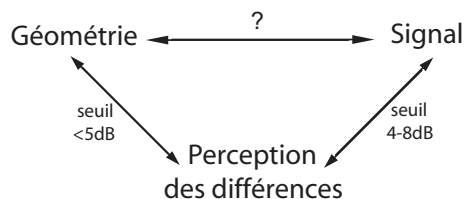


Figure 1.30: Les liens Données subjectives - Signal - Géométrie

permis de trouver des "airs de famille" entre les instruments et d'étiqueter ces familles (son "claquant" vs "bon son"). Les spectrogrammes ont permis de caractériser chaque famille et de donner un début d'interprétation aux différences perçues (retards, bandes d'énergie, transitoires d'attaque). Il semble cependant illusoire de croire que l'on pourra extraire du signal tous les paramètres influençant la qualité sonore perçue et que l'on va pouvoir, en modifiant la géométrie de l'instrument, contrôler ces variations. Pour explorer d'autres indices, les scientifiques optent pour l'impédance d'entrée de l'instrument à vent, courbe caractéristique de sa perce donc, directement reliée à la géométrie interne de l'instrument.

### 1.3.3.3 Données subjectives et Impédance

Plusieurs études tentent de relier des données subjectives à des paramètres issus de la courbe d'impédance, et ce, sur divers instruments.

#### a - Le trombone

Les premiers travaux sur les relations subjectif/objectif concernant l'impédance d'entrée de cuivres ont été réalisés par Pratt et Bowsher à la fin des années 70 [PRA 78], [PRA 79]. Dans le premier article, les auteurs cherchent à définir et quantifier le timbre, la réponse de l'instrument, le sentiment général. Deux sortes de méthodes d'analyse des données sont employées :

- MDS = Multi-Dimentional Scaling. Les stimuli sont présentés par paires et le sujet doit estimer la distance entre les deux éléments entendus ;
- SDS = Semantic Differential Scaling. La consigne est de positionner chaque son enregistré sur une échelle ayant à chaque extrémité un mot opposé à l'autre.

Les échelles choisies sont

- Terne / brillant,
- Dirigé, compact / Diffus,
- non perçant / perçant.

L'analyse de la variance des résultats montre que l'échelle Compact / Diffus n'est pas discriminante. Elle est donc éliminée pour la suite de l'étude. Le timbre étant difficile à évaluer sur une seule note, une nouvelle expérience mettant en jeu des sons de différentes

intensités et hauteurs a été pratiquée. Mais les résultats difficilement interprétables ont orienté les auteurs vers l'organisation de tests non plus d'écoute mais de jeu. Sept descripteurs ont été donnés : Dynamique, Juste, Réponse, Résistant, Ouvert, Timbre plaisant, Souplesse du timbre. Cette tâche s'est avérée trop difficile et a donc été complétée par un test de classement sur 3 échelles (justesse, ouverture et réponse) puis sur une échelle de préférence par un professionnel. Les résultats montrent que la trompette la moins juste et la trompette la moins ouverte se trouvent être les dernières dans le classement des préférences.

Dans l'évaluation objective de trombones, Pratt et Bowsher mesurent l'impédance de 7 instruments et en calculent les critères HSD (Harmonic Standard Deviation), le "Factor Loading" et le facteur de qualité pour chaque pic. Un tromboniste les a ensuite classés, avec sa propre embouchure, sur une échelle de fermé à ouvert et de timbre déplaisant à timbre plaisant. Les corrélations entre ces données subjectives et les courbes d'impédance sont biaisées par le fait que le tromboniste utilise sa propre embouchure, donc, modifie l'impédance des instruments concernés. Puis, l'influence de différents paramètres est étudiée, comme la propreté de l'intérieur de l'embouchure et la finition de la fabrication.

Le reproche qui peut être formulé concerne les hypothèses fortes et non validées. Une des hypothèses de départ est, au début de l'étude subjective, que le tromboniste peut corriger la justesse facilement avec la coulisse, donc, que ce n'est pas un critère de choix d'un instrument. Et, dans la quatrième épreuve, le descripteur justesse est donné à évaluer, sans autre explication. Le problème cité plus haut de l'embouchure propre au musicien rend les conclusions de l'étude assez discutables, avec peu de corrélations significatives. Cette étude reste néanmoins une référence, fournissant pour la première fois des indicateurs perceptifs et objectifs sur les sons et les instruments de musique.

## **b - La trompette**

Les tests d'écoute ont été utilisés dans une étude sur les embouchures de cuivres. Campbell et Wright [WRI 98] ont utilisé la procédure suivante pour sélectionner les stimuli sonores. Sur 6 répétitions, les 3 plus stables en amplitude et en hauteur ont été sélectionnées. Ils ont été présentés par paires au cours d'une étude comportant 3 tests perceptifs.

### *Test 1*

Le premier avait pour but de mesurer l'influence de l'embouchure sur le son perçu en comparant des sons produits par des trompettes avec deux embouchures de trompette et une de cornet. Il s'avère alors plus facile de distinguer l'embouchure de cornet de l'une ou l'autre de trompette que les deux embouchures de trompette entre elles. Cela est expliqué par le fait que l'embouchure influence l'amplitude des pics d'impédance de l'instrument qui variaient de 1 à 3 dB entre les deux embouchures de trompette et entre 1 et 10 dB

entre embouchure de trompette et de cornet.

### Test 2

Les stimuli du deuxième test étaient des sons de cornet avec 4 embouchures différentes sur 2 notes : La et Ré 4. Les différences d'embouchures étaient assez subtiles mais les résultats du test montrent que les sujets arrivent tout de même à différencier les sons. Il s'avère surprenant que d'aussi petites variations de géométrie d'embouchure soient perceptibles. Elles le sont d'ailleurs de plus en plus quand les notes sont aiguës.

### Test 3

Pour compléter l'étude en quantifiant les variations de fréquences de résonance et également pour tester l'influence du bruit dans la synthèse, un troisième test a été mis en place avec des sons de cornet, de trompette et de synthèse. Il en résulte un rôle très important du bruit dans les sons de synthèse, comme une composante inharmonique qui influence le timbre. Il a été également montré que les composantes supérieures à 10KHz n'étaient modifiées que trop peu pour permettre une différenciation systématique des sons.

En résumé, les embouchures sont différenciées sur un plan perceptif si les fréquences de résonance sont différentes ou si les pics de résonance n'ont pas la même amplitude. Ce travail, riche en résultats, tente donc de relier son perçu, géométrie et impédance (figure 1.31). Les changements de cuvette d'embouchure provoquent des variations de timbre perçu. Cependant, il manque encore la relation directe entre la géométrie et le son perçu, ce qui serait très important pour les concepteurs d'instruments.

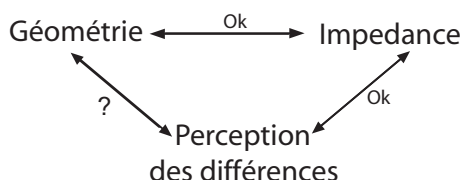


Figure 1.31: Les relations données perceptives - impédance - géométrie

Pour avoir de nombreuses données, Begnis [BEG 98], interroge les instrumentistes sur les critères de choix d'une trompette par l'intermédiaire d'une enquête en ligne sur internet. Arrivent alors en tête la justesse et le timbre, considérés par l'auteur comme contrôlables par le musicien, puis "l'ouverture", qui est le centre de l'étude. L'épreuve est ici une notation monopolaire sur le critère sélectionné : dans un premier temps, en jouant l'instrument et dans un deuxième temps, en écoutant des extraits enregistrés. En parallèle, les courbes d'impédance des trompettes sont mesurées et des indices tels que la variance des fréquences de résonance pondérées, les facteurs de qualité et leur moyenne ou les amplitudes des pics sont relevés et leur évolution a été comparée à celles des données subjectives. Malheureusement, les tests perceptifs étant longs à réaliser et les techniques d'analyse nécessitant beaucoup de données, les corrélations furent assez limitées. Du fait du grand nombre de paramètres de conception, les combinaisons sont également très

nombreuses et il faut donc beaucoup d'observations pour utiliser les outils de corrélation.

Les épreuves demandées aux sujets sont souvent nouvelles pour eux et il est risqué de penser que la réussite de l'épreuve donc la fiabilité des résultats est proportionnelle à la qualité instrumentale du testeur. En effet, faire les tests avec des professionnels qui connaissent les différents instruments du commerce induit un biais sur l'objectivité des résultats. Les solistes étant souvent liés à une marque, ils ne peuvent que reconnaître leur instrument, même avec les yeux bandés et les mains gantées. Il est donc bon d'avoir plusieurs catégories de trompettistes à interroger car leurs attentes ne sont pas les mêmes. C'est le cas de Mathias Bertsch [BER 03], qui travaille dans la thématique expliquée au chapitre précédent, à savoir trouver un langage commun entre musicien, luthier et scientifique. Pour cela, il faut relier les notions exprimées par chacun. Pour obtenir les données subjectives, un questionnaire a été mis en place comprenant des questions sur différentes facettes de la trompette :

- les préférences subjectives et les attributs descriptifs de la qualité du son comme le timbre, la projection, le volume ;
- le transitoire d'attaque de la note comme la facilité de répétition, la rapidité d'attaque ;
- le contrôle des notes comme le volume d'air, la stabilité des notes ;
- la classification des instruments comme l'adaptation au public visé, au type de musique.

Les critères physiques choisis, relevés dans les courbes d'impédance mesurées par BIAS sont l'offset, l'enveloppe, la courbure, le demi facteur de qualité droit et gauche, la somme des deux, la phase, le retard de groupe, le passage par zéro de la phase (zerophase). Les corrélations entre les réponses au questionnaire et les mesures physiques ne sont pas encore publiées.

### **c - Le cor**

Le rôle primordial de l'embouchure est également étudié par Plitnik [PLI 99] sur le cor. La première étape a consisté à approcher les préférences des musiciens en demandant à 34 cornistes de tester hédoniquement, sans consigne, 4 embouchures très différentes. Si ce test est limité pour tenter de corréler des variables de préférences aux critères physiques de l'embouchure, le consensus qui se dégage des réponses est étonnant et indique une tendance de choix de la part des cornistes. Le cor a été ensuite modélisé pour tester les différentes embouchures en contrôlant le reste de l'instrument. Pour valider les descripteurs choisis, 13 professionnels ont eu à classer 7 embouchures sur un instrument réel et sur le tuyau le modélisant, sur les échelles suivantes :

- flexibilité, c'est-à-dire facilité à passer d'un partiel à l'autre sur un même doigté,



- contrôle de la hauteur de la note,
- facilité de jeu,
- justesse,
- qualité du son,
- échelle de dynamique,
- précision de l'attaque.

A la fin de cette épreuve, un classement sur une échelle de préférence était demandé. Les cornistes ont réalisé cette tâche avec succès. Mais les épreuves étant lourdes à mettre en place, seul un corniste professionnel habitué aux notions psychoacoustiques étudiées a été conservé pour la suite de l'étude sur l'ensemble des descripteurs. Sa tâche a été de répartir les 7 embouchures proposées en trois catégories : "like", "neutral" ou "dislike", donc, "j'aime", "indifférent", "je n'aime pas" pour chaque descripteur. Avec l'étude des courbes d'impédance, Plitnik relie les notions psychoacoustiques aux paramètres des courbes. Par exemple, la facilité de jeu serait corrélée à l'inverse du facteur de qualité. Mais pour réaliser de telles corrélations, il faut un nombre de produits significatif. Or, seules 7 embouchures ont été étudiées. De plus, tirer des conclusions avec des données d'un seul musicien est source de risque car la fatigue ou la déconcentration du sujet ne sont pas maîtrisées. Il aurait fallu lui faire suivre un entraînement sévère pour le rendre très répétable. Les tests réalisés ne montrent pas de bonnes corrélations terme à terme. La dernière partie de l'étude a consisté à définir de nouveaux paramètres psychoacoustiques, comme combinaisons des premiers, et de tenter de les relier aux paramètres physiques de l'impédance. La "jouabilité" définie comme combinaison de dynamique, facilité de jeu et souplesse et la réponse tonale comme qualité du son, précision d'attaque et contrôle de hauteur sont donc les deux échelles sur lesquelles le corniste devait classer les instruments. Le problème qui perdure est que le nombre d'individus et de produits est trop petit pour utiliser les méthodes d'analyse de données ou de statistiques. Les conclusions restent donc assez discutables.

#### **d - Le basson**

Le basson fut également étudié [SHA 03], plus particulièrement l'influence du bocal sur le son perçu. Le bocal est le petit tuyau de cuivre coudé qui relie l'anche double au corps de l'instrument. Dans cette étude, 6 bocaux sont étudiés en mesurant leur profil et leur courbe d'impédance. Ensuite, les sons produits par ces bocaux, associés au même basson ont été enregistrés par 2 musiciens en chambre sourde. Six répétitions de chaque note (F2, C3, F3, F4) ont été recueillies pour chacun des bocaux, puis 3, les plus stables, ont été sélectionnées. Avec ces 72 sons, 60 paires ont été constituées. Le test n'est pas complet, la durée de l'épreuve devant être surveillée pour ne pas voir apparaître le phénomène de lassitude. 15 sujets ont noté ces paires sur une échelle de timbre de 0 (peu différents) à

10 (très différents). Pour pouvoir contrôler les juges, des paires de sons identiques (même bocal, même musicien mais pas même répétition) ont été présentées. Le premier constat est que les différences sont perçues entre deux bocaux. De plus, les différences entre une paire de sons identiques ne sont pas fortement perçues, ce qui semble logique car l'écart étant inférieur à 5 cents, l'oreille humaine ne peut le percevoir. Le troisième point est que l'écart de géométrie entre les branches et les scores de différences ne sont pas reliés linéairement. Ce travail présente cependant un choix surprenant : les sons présentés pour le test n'étaient pas normalisés en hauteur c'est-à-dire que les testeurs devaient évaluer des paires de sons sur le critère du timbre en faisant abstraction du fait qu'ils n'avaient pas la même fréquence fondamentale. Il semble évident que deux sons de hauteur différente vont être notés comme non semblables et pas particulièrement sur l'attribut de timbre. Ce choix rend les résultats des tests perceptifs moins fiables. Les deux solutions qui peuvent être proposées sont :

- soit d'accorder l'instrument avant chaque enregistrement. Dans ce cas, le bocal est légèrement enfoncé ou tiré, ce qui implique un paramètre variable nouveau et ne permet plus d'isoler la cause de variations perçues,
- soit de modifier numériquement le signal pour obtenir une famille de sons homogènes du point de vue de la hauteur.

### **e - La guitare**

Il faudra attendre les années 90 pour que la qualité des instruments de musique soit étudiée sur un plan perceptif, et pour avoir une méthodologie de recueil des données subjectives. Le but du travail de Wright [WRI 96] est de déterminer l'importance relative des différents paramètres acoustiques du corps de la guitare sur la qualité du son. Pour cela, l'auteur choisit d'étudier les modes de résonance définis par 4 variables : fréquences de résonance, facteur de qualité, masse effective et surface effective. Le premier test consistait pour les sujets à écouter des paires de sons de synthèse correspondant aux différents modes propres du plateau haut, bas et de la cavité d'air et de dire s'ils percevaient une différence. L'influence de chaque variable ainsi que son seuil de variation significative ont pu être étudiés. Les différences étant perçues pour certaines combinaisons, il a été demandé dans la deuxième épreuve de quantifier ces différences sur une échelle de 0 à 3, pour permettre d'étudier plus finement les corrélations issues du test 1. Ensuite, c'est la nature des différences qui a été étudiée dans les deux tests suivants. Plus que les corrélations, c'est surtout la méthodologie qui nous a intéressée dans cette thèse. En effet, les paramètres de la guitare étant difficilement comparables à ceux d'un cuivre, notre intérêt s'est porté non pas sur les indices eux-mêmes mais sur la façon de les déterminer, sur la procédure de mise en place des tests, de leur déroulement, sur la méthode pour capter le subjectif et le corrélérer aux données objectives.

C'est un problème que nous avons également retrouvé dans notre étude sur les trompettes. Nous avons opté pour équilibrer les sons de façon numérique après enregistrement.

## 1.4 Conclusions

Ce premier chapitre avait pour objectif de présenter les notions essentielles à la compréhension de l'étude que nous avons menée. Sur le plan de la conception, nous avons montré l'importance de la prise en compte du consommateur dans le processus de conception. En effet, les méthodes rationnelles sont limitées dans l'interaction avec l'utilisateur, ce qui les éloigne de la demande réelle. De plus en plus de méthodes tentent d'intégrer le client dans plusieurs étapes du processus de conception. Notre travail se situe dans l'univers du *kansei engineering*, utilisant des techniques du domaine de l'analyse sensorielle.

Nous avons choisi d'appliquer notre étude de conception centrée utilisateur aux instruments de musique de type cuivre, et plus particulièrement à la trompette. De nombreux auteurs, cités précédemment, ont mené des études visant à comprendre le fonctionnement des instruments de musique et d'en augmenter la qualité. Grâce à l'évolution des sons de simulations par modèles physiques, et à la bouche artificielle, et en s'inspirant de toutes ces études perceptives-instrumentales, nous avons mis en place notre propre méthode de conception, utilisant une nouvelle démarche de recueil de données sensorielles. Ce travail est présenté dans le chapitre 2.

---

# Proposition d'une Méthode de Conception Orientée Client

<b>2.1</b>	<b>Rappel de la problématique . . . . .</b>	<b>56</b>
<b>2.2</b>	<b>Description des différentes étapes de la méthode . .</b>	<b>57</b>
2.2.1	Définition du besoin et des préférences . . . . .	58
2.2.2	Relation perceptif / objectif . . . . .	63
2.2.3	Définition et validation du cahier des charges . . . . .	66
2.2.4	Optimisation . . . . .	66
<b>2.3</b>	<b>Application à la trompette . . . . .</b>	<b>67</b>
2.3.1	Création de l'espace produit : Génération d'une famille de trompettes . . . . .	67
2.3.2	Analyse perceptive : les descripteurs sensoriels de la trompette . . . . .	72
2.3.3	Analyse perceptive : la formation des experts . . . . .	74
2.3.4	Analyse perceptive : la séance d'évaluation . . . . .	89
2.3.5	Analyse objective : les mesures d'impédance . . . . .	98
2.3.6	Corrélations données objectives / données perceptives	100
2.3.7	Optimisation . . . . .	103
2.3.8	Validation de la branche idéale . . . . .	111
<b>2.4</b>	<b>Conclusions . . . . .</b>	<b>111</b>

L'utilisateur est la personne la mieux placée pour juger un produit. C'est en effet lui qui décide s'il correspond à ses besoins, à ses attentes et s'il est susceptible de l'acheter. Pour ne pas s'éloigner de ses préférences, le client doit participer très tôt dans le processus de conception, et non pas seulement donner une simple évaluation une fois le produit fabriqué. La conception centrée utilisateur impose que le développement du produit soit guidé par les attentes, les besoins des utilisateurs qui font partie de l'équipe des concepteurs. Dans ce chapitre, après un bref rappel de la problématique, la méthode de conception orientée client que nous proposons est présentée tout d'abord de manière générale, puis chaque étape est détaillée, en s'appuyant sur notre cas d'étude, un instrument de musique de type cuivre : la trompette.

## 2.1 Rappel de la problématique

Pour décoder le choix des consommateurs pour un produit, il faut tout d'abord comprendre le cheminement de l'information du produit jusqu'au client (Figure 2.1). Le produit, qui possède des caractéristiques physiques, est présenté au client. Celui-ci le perçoit par l'intermédiaire de ses 5 sens. Les caractéristiques physiques du produit sont donc filtrées et exprimées en termes de qualités organoleptiques (relatives aux sens) du produit. Cette étape de traitement de l'information par le client dépend de nombreux éléments, tant psychologiques que psychosociaux ou émotionnels. Ces perceptions entraînent un classement des produits en terme de préférence, ce qui permet au consommateur de faire son choix.

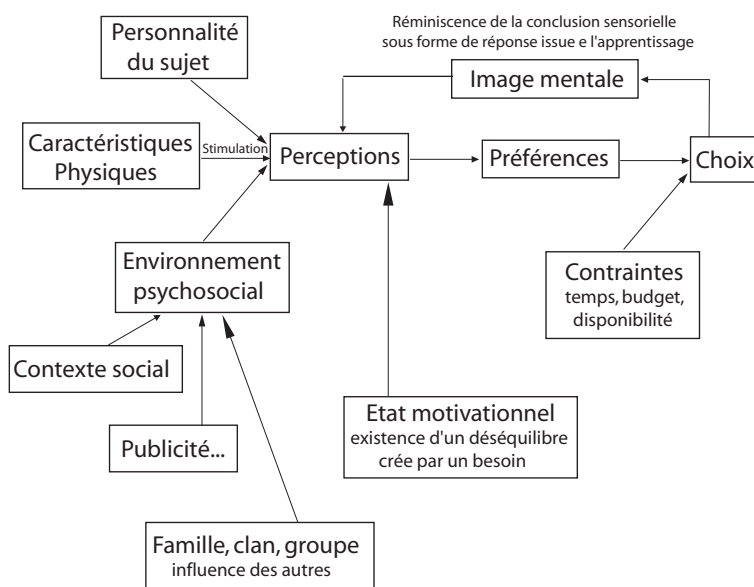


Figure 2.1: Schéma du modèle de Brunswick en perceptiologie

L'objectif pour les concepteurs est de déterminer les paramètres de conception (P.C.) qui influencent de manière positive le choix du consommateur. De son côté, le consommateur

exprime son appréciation du produit au travers de sensations, de données perceptives (D.P.). Alors qu'il est possible d'établir une relation entre les paramètres de conception d'un produit et les données perceptives fournies par l'homme sur ce produit, la relation inverse est compliquée à déterminer. En effet, il apparaît difficile de remonter aux paramètres de conception à partir des sensations collectées chez le consommateur. Le mécanisme de perception est complexe : pour un nombre de dimensions perceptuelles réduit, le nombre de caractéristiques physiques ou variables de conception est énorme, ce qui rend le processus de traitement de l'information par le cerveau très complexe.

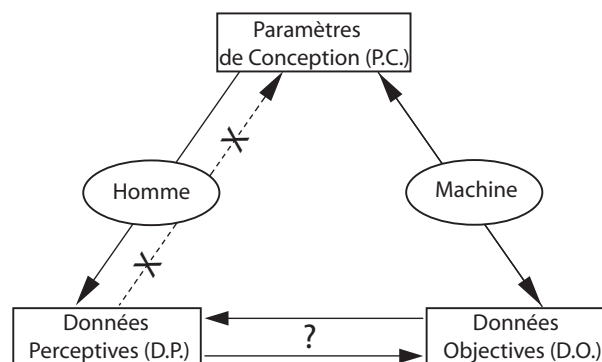


Figure 2.2: Relations Paramètres de Conception (P.C.), Données Perceptives (D.P.) et Données Objectives (D.O.)

Il est donc nécessaire de passer par un intermédiaire pour guider les paramètres de conception par les préférences du consommateur : les données objectives (D.O.)<sup>1</sup>. Elles sont issues de mesures ou de calcul à partir des paramètres de conception. Il est possible de retrouver les paramètres de conception à partir de ces données objectives.

Il reste alors un seul lien à établir, celui qui relie les données perceptives aux données objectives. C'est ce qui représente notre problématique de recherche.

## 2.2 Description des différentes étapes de la méthode

Le client doit être consulté souvent au cours de la démarche de conception pour éviter de s'éloigner de ses besoins. Le schéma 2.3 représente les étapes d'une méthode de conception que nous avons mise au point où l'utilisateur intervient à différents niveaux, soit en tant que client (C) soit en tant qu'expert (E)<sup>2</sup>. D'un point de vue général, l'objectif est de déduire d'un ensemble de produits des règles d'inférence entre les paramètres de conception, les données objectives et les données perceptives issues de tests sensoriels et de tests hédoniques dans lesquels les utilisateurs indiquent leurs préférences. Ces règles permettent de définir un cahier des charges qui doit être validé et qui sert de point de

<sup>1</sup>nous utiliserons le terme "objectives" au lieu du terme plus communément employé "instrumentales", pour ne pas introduire de confusion avec notre produit qui est un "instrument" de musique

<sup>2</sup>cette notion sera détaillée dans le chapitre suivant

départ à la recherche d'un produit répondant aux besoins de l'utilisateur. Les différentes étapes de la démarche sont commentées dans la suite du chapitre.

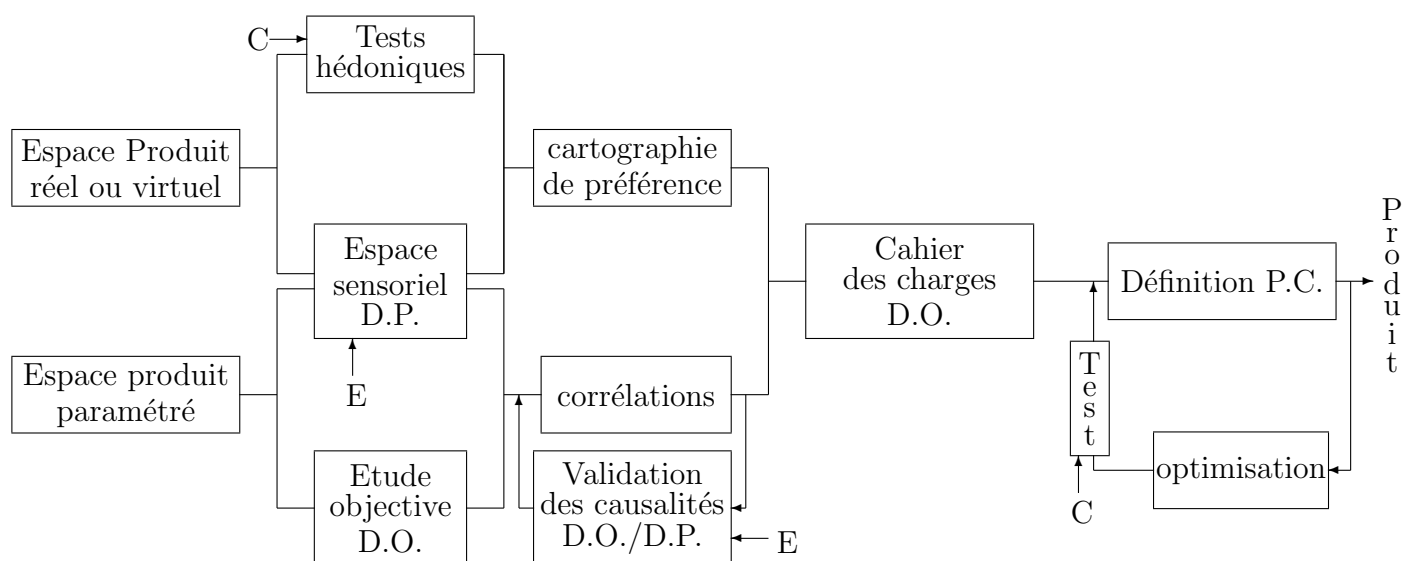


Figure 2.3: Les différentes étapes de la démarche de Conception Orientée Client

### 2.2.1 Définition du besoin et des préférences

La première étape dans la démarche de conception, une fois le type de produit choisi, est de cerner les besoins des utilisateurs, d'isoler les défauts et qualités des produits existants pour comprendre le choix du client. Il s'agit donc d'une étude de marché sensorielle, basée non pas seulement sur une observation du marché mais sur une consultation des consommateurs.

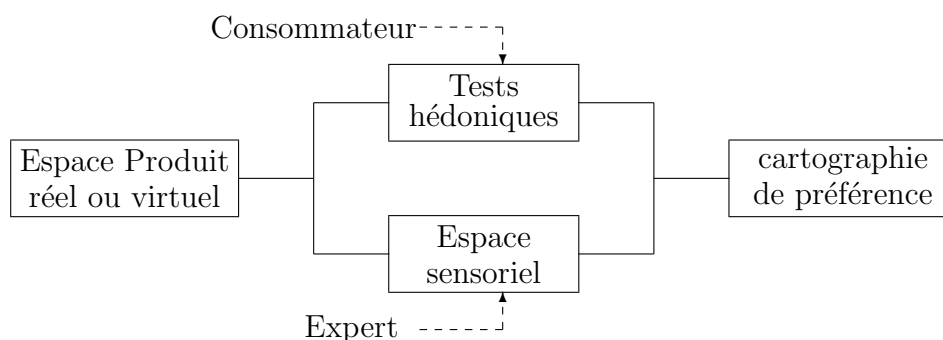


Figure 2.4: Le bloc "Définition du besoin"

A partir d'un ensemble de produits appelé "espace produit" (Figure 2.4), le consommateur exprime ses préférences par l'intermédiaire de tests hédoniques et l'expert fournit

les données perceptives nécessaires à la mise en place de l'espace sensoriel. Ces deux types de données permettent de déterminer dans quel sens évoluent les préférences en fonction des produits.

### 2.2.1.1 Espace produits et tests hédoniques

L'*espace Produit réel ou virtuel* à explorer pour déterminer la demande peut être constitué de produits du commerce ou bien de leur représentation virtuelle, dans le cas d'objet très encombrants, non disponibles ou de réalisation trop coûteuse. Cet espace produit regroupe les stimuli utilisés dans les *tests hédoniques*. Ces épreuves visant à déterminer le caractère plaisant ou déplaisant d'un produit sont réalisées par les consommateurs eux-mêmes. Le principe pour le consommateur naïf (non entraîné) est d'indiquer s'il aime ou s'il n'aime pas le produit présenté. L'épreuve peut également être de type comparatif, en demandant au client quel produit il aime plus que l'autre. Les données obtenues lors des tests hédoniques sont des données subjectives renseignant sur l'appréciation globale du produit. Elles indiquent le positionnement relatif des produits dans un plan perceptif.<sup>3</sup>

### 2.2.1.2 Espace sensoriel (Figure 2.3)

Parallèlement à cela, un *espace sensoriel* est dessiné pour tenter d'interpréter ces préférences par les propriétés organoleptiques des produits. Pour constituer cet espace sensoriel, 2 étapes sont nécessaires : la détermination des descripteurs et les séances d'évaluation des produits. Ces épreuves doivent être réalisées non plus par des sujets naïfs mais par des experts. Définissons dans un premier temps cette notion d'expert.

#### 2.2.1.2.1 La notion d'expert et leur formation

Les tests perceptifs tels les notations sur les descripteurs nécessitent un entraînement car il est très difficile de noter un produit sur un critère isolé. Habituellement, nous apprécions plutôt le produit d'une manière générale. Si l'on s'en réfère aux normes ISO 8586-1 [ISO 93] et 8586-2 [ISO 94b] relatives à la sélection, l'entraînement et le contrôle des sujets, trois types de personnes peuvent réaliser des évaluations sensorielles :

- les "sujets" naïfs (sans qualité particulière) ou des initiés (ayant déjà participé à un test sensoriel),
- les "sujets qualifiés", déjà sélectionnés et entraînés,
- les "experts", faisant preuve d'une acuité et d'une fiabilité particulière.

---

<sup>3</sup>Il est nécessaire de renouveler ces tests régulièrement car, bien que certaines réponses hédoniques paraissent innées, l'expérience et l'apprentissage peut les modifier [DEP 98]. Les effets de mode et l'évolution de la société joue un rôle certain dans les choix des clients.



Est considéré comme expert un individu qui, après un entraînement lui permettant de se familiariser avec la tâche et les descripteurs, développe des qualités particulières en terme de répétabilité et de mémoire sensorielle, donc de fiabilité de jugement. Etant très dépendant du type d'épreuve et de produit, le "taux" de répétabilité admis pour passer au grade d'expert est laissé au choix de l'examineur. Les aptitudes souhaitables d'un expert sont :

- la mémoire des propriétés sensorielles,
- la faculté à rédiger des notes claires et logiques,
- des connaissances générales autour de la gamme de produits (...),
- la connaissance des aspects techniques des produits concernés (...),
- l'aptitude à communiquer avec d'autres personnes, experts ou non.

Dans cette catégorie, on peut trouver des experts et des experts spécialisés qui, en plus de leur maîtrise de la tâche demandée, ont acquis des connaissances complémentaires sur le domaine et le produit à évaluer (procédé de fabrication, historique, modèle du commerce...).

Pour devenir expert, le sujet doit suivre une formation. Le but de la séance est d'initier les sujets au matériel utilisé, aux conditions de test et aux épreuves d'évaluation sensorielle. Il est très difficile car totalement inhabituel d'apprécier un produit selon un critère précis plutôt que dans son ensemble [DEP 98]. La formation va permettre aux experts de développer leur potentiel sensoriel et aux examinateurs d'évaluer la potentialité des candidats à devenir experts. Ces épreuves peuvent être de plusieurs types :

- les épreuves discriminatives : leur but est de détecter une différence ou non entre les produits. On peut demander au sujet de différencier 2 produits, d'apparier 2 des 3 produits présentés (épreuve triangulaire), de comparer des échantillons à un témoin (A - non A) ;
- les épreuves de classement : l'objectif est, dans le cas où la différence est perçue, de donner un ordre par rapport à un critère précis ;
- les épreuves d'évaluation de l'intensité : les produits peuvent recevoir une note par rapport à un échantillon témoin (épreuve de rapport) ou bien dans l'absolu, sur une échelle (épreuve de cotation).

Pour pouvoir tester la répétabilité donc la fiabilité des sujets, certains produits sont présentés plusieurs fois, sans, bien sûr, en informer le sujet. Le nombre de séances d'entraînement est laissé à l'appréciation de l'évaluateur.

#### **2.2.1.2.2 La détermination d'une liste de descripteurs**

Nous cherchons à comprendre comment s'effectue le choix d'un produit pour un client, donc à analyser les préférences qui le conduisent à l'accepter ou à le refuser. Pour cela,

les caractéristiques sensorielles du produit doivent donc être décrites pour tenter de les corréler avec ses données physiques et aux données de préférence. Ces caractéristiques sensorielles sont appelées "descripteurs". La définition admise dans le domaine de l'analyse sensorielle [DEP 98] est : "ensemble de mots renvoyant à un élément de la perception du produit, devant répondre à 3 exigences majeures (en gras) et 2 mineures" :

- **la pertinence** : les descripteurs doivent avoir un lien clair et direct avec le produit dont il est question, le descripteur doit être monodimensionnel ;
- **la précision** : les descripteurs ne sont pas décomposables en sous-descripteurs, ils sont simples, unitaires. Les descripteurs doivent également être sans ambiguïté, non évasifs ;
- **la discrimination** : les descripteurs doivent permettre de discerner les produits. Ce sont des mots pour lesquels les produits sont situés sur une large échelle de valeurs ;
- l'exhaustivité : le produit doit être décrit entièrement par les termes et non seulement partiellement ;
- l'indépendance : les descripteurs ne doivent pas être redondants, cela n'apporterait rien à l'étude, si ce n'est du temps d'épreuve et de traitement.

Il existe plusieurs méthodes pour établir une liste de descripteurs, que l'on peut regrouper en deux familles :

- le "profil libre" : la méthodologie type profil libre laisse à chaque expert le choix de ses termes ainsi que de leur nombre (en prenant soin quand même de contrôler leur validité en pertinence, précision et discrimination). C'est le cas du profil flash par exemple [DEP 98] ;
- le "profil classique" : le principe est de donner à tous les sujets la même liste de descripteurs. Pour générer ces descripteurs, on peut soit fournir une première liste et la faire évoluer avec les sujets, soit laisser chaque sujet créer sa propre liste de termes puis trouver dans un deuxième temps un consensus dans une séance de groupe (figure 2.5).

Le but de cette étape est de mettre au point une liste de "descripteurs", c'est-à-dire de termes aptes à décrire la perception des produits que l'on souhaite étudier [URD 01]. Le choix de ces termes est primordial pour la suite de l'étude, puisque la pertinence des données subjectives en dépend directement. A chaque descripteur doit également être associée une procédure d'évaluation, c'est-à-dire une méthode de test du critère. Par exemple, le caractère tanique d'un vin pourra être testé en "faisant glisser la langue contre le palais en aspirant de l'air".

Pour un produit donné, et pour chaque descripteur trouvé, une note peut être attribuée. L'ensemble de ces descripteurs quantifiés constitue le profil de l'instrument [DEP 98]. C'est cette carte d'identité du produit soulignant ses caractéristiques parti-

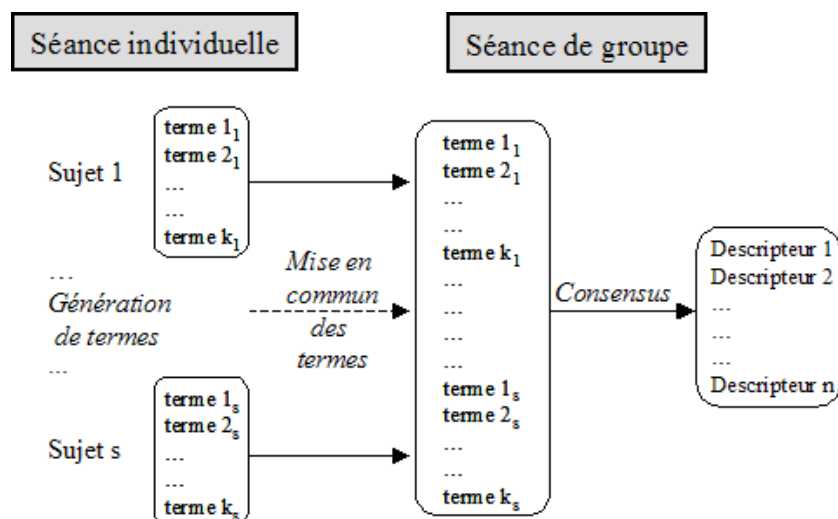


Figure 2.5: Déroulement de la création d'une liste de descripteurs

culières qui permet la comparaison. Rappelons que les sujets devront être entraînés à la quantification des descripteurs pour obtenir un résultat fiable et exploitable.

### 2.2.1.2.3 Les séances d'évaluation

Grâce à l'entraînement, les sujets sont maintenant considérés comme experts, c'est-à-dire que leur jugement est discriminant et consensuel. Ils savent donc noter les produits en vue d'acquérir les données sensorielles requises. Le but de cette épreuve d'évaluation est de récolter des "notes" pour les descripteurs sélectionnés et pour un nombre de produits donnés. Si chaque sujet note tous les produits sur tous les descripteurs, on parle d'un plan d'expérience complet. Le nombre de produits à tester multiplié par le nombre de descripteurs et le temps d'évaluation d'un descripteur ne permet que rarement de le mettre en place. Cependant, les techniques de statistiques appliquées à l'analyse sensorielle s'adaptent à des plans d'expérience incomplets.

Après l'entraînement, le panel de sujets est censé répondre de façon homogène. Il ne devrait donc plus être nécessaire de vérifier leur concordance. Cependant, à tout moment, un sujet peut, pour une raison imprévisible (fatigue, stress...), changer sa façon de noter. Il n'est donc pas superflu d'observer chaque sujet par rapport au groupe.

Les experts sont formés sur un type d'épreuve durant l'entraînement. Il ne faut donc pas modifier la nature du test dans la séance d'évaluation : cela réduirait l'entraînement à une simple découverte du matériel.

Cette épreuve d'évaluation des produits suivant les descripteurs donnés fournit les profils de chaque produit. Ces données peuvent être reliées aux données de préférence issues des tests hédoniques par la méthode de *cartographie des préférences* [DEP 98].

### 2.2.2 Relation perceptif / objectif

Le second volet de la méthode consiste à chercher des corrélations entre un "nouvel" espace sensoriel et les données objectives du produit. L'espace sensoriel est qualifié ici de nouveau par rapport au précédent qui était constitué de produits du commerce, existants. Dans ce nouvel espace, les produits sont paramétrés pour contrôler les changements d'un produit à l'autre : les descripteurs restent les mêmes mais, les produits à tester étant différents de ceux du premier espace produit, les réponses perceptives diffèrent.

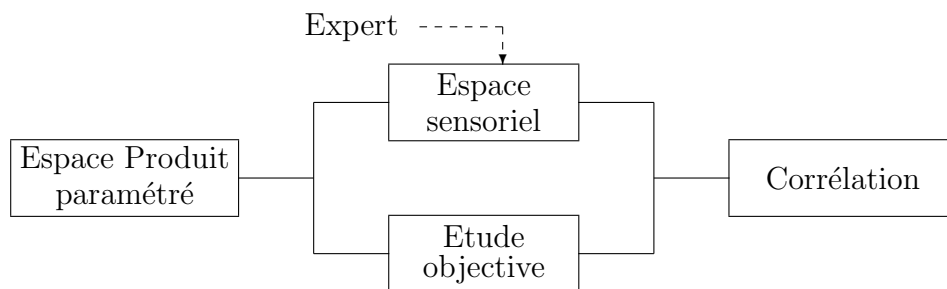


Figure 2.6: Le bloc "La relation perceptif / objectif"

La figure 2.6 présente le bloc "relation perceptif / objectif", montre l'intervention de l'expert pour la création de l'espace sensoriel. En parallèle, l'étude objective est menée pour corréler les mesures aux données perceptives.

#### 2.2.2.1 Espace produit et choix du paramètre

L'espace produit est l'ensemble des produits à tester. Il est borné à ce qui est réalisable d'un point de vue technique, et à ce que l'on souhaite étudier. Pour créer l'espace produit et trouver des corrélations avec les résultats de tests perceptifs, il faut contrôler les différences physiques entre ces produits, et pouvoir les mesurer. Il est préférable d'isoler un unique paramètre, et de ne modifier que celui-ci. La taille de l'espace dépend de l'objectif de l'étude et de la durée des épreuves pour les sujets.

La création de l'espace produit est très importante pour l'étude. L'analyse du problème est primordiale pour générer des produits adaptés. Il serait, par exemple, totalement inutile de faire varier la taille du contenant pour étudier le caractère sucré d'un yaourt. Le paramètre variable doit être choisi de façon pertinente. De plus, pour pouvoir corréler notations perceptives et paramètres physiques d'un produit, il est nécessaire de maîtriser les changements d'un produit à l'autre. Si la voiture A est préférée à la B, et que le modèle, l'année, la couleur, la motorisation, les options diffèrent, malgré les outils puissants d'analyse de données, il sera difficile d'isoler la cause des différences de notation. Dédire les règles des préférences des clients en général devient très complexe. Par contre, si seule la présence de climatisation varie, on peut alors déduire son rôle quant au choix du véhicule

par le consommateur. Il est préférable de n'avoir qu'un seul paramètre variable entre les produits. Or, il est rare de trouver dans le commerce des produits variant sur une seule dimension, d'où la nécessité d'utiliser un produit paramétrable, pour maîtriser la nature et l'intensité des changements. La deuxième possibilité serait, en fonction des sens mis en jeu dans le test, d'utiliser la réalité virtuelle : des modélisations numériques pour le côté visuel, des simulations sonores pour le côté auditif, des mélanges d'essences pour l'olfactif par exemple. La réalité virtuelle ne permet cependant pas de tester le produit en situation d'usage, contrairement au produit paramétrable.

Le choix du paramètre se fait :

- soit a posteriori par rapport aux études précédentes, donc aux informations issues des espaces sensoriels ou de cartographie de préférence,
- soit a priori, à l'intuition du designer, parfois inspiré par les retours client.

### 2.2.2.2 Analyse perceptive : espace sensoriel

C'est sans doute l'étape la plus caractéristique de cette démarche de conception orientée client. Comme dit précédemment, elle se décompose en 2 parties dans lesquelles l'expert intervient à chaque fois :

- la définition du profil : le profil est l'ensemble des termes quantifiés qui définissent le produit. C'est une véritable carte d'identité, le caractérisant et permettant de le distinguer des autres. Pour une bonne adaptation des termes, les utilisateurs eux-mêmes les génèrent au cours d'une épreuve appelée "Verbalisation"
- la séance d'évaluation : après la formation, les experts peuvent tracer sans faille, c'est-à-dire de façon fiable et répétable, le profil des produits, en les notant sur leurs dimensions caractéristiques. Ce sont ces données que l'on peut tenter de relier aux mesures physiques.

La liste de descripteurs reste la même, que ce soit pour les produits du commerce ou les produits paramétrés. Généralement, le type d'épreuve est également identique entre les séances d'entraînement et d'évaluation.

### 2.2.2.3 Etude objective (Figure 2.3)

*Objectif* est défini, dans le dictionnaire de l'académie française, comme ce "qui représente un objet tel qu'il est en réalité, sans aucune déformation de notre esprit(...)". Il s'oppose donc bien directement au terme *subjectif*. Les paramètres objectifs sont issus de mesures et non de jugements et sont donc des données chiffrées qualifiant le produit. Parmi toutes les mesures possibles, ces indicateurs sont sélectionnés par rapport à la littérature et à l'intuition du scientifique en fonction de la cible du projet. Pour un produit alimentaire tel le vin, on utilisera sa composition exacte, comme le taux de glycérol, d'acide tartrique,

de potassium par exemple. Pour des textures [URD 01], les données psycho-chimiques, la microstructure, la viscosité ou les propriétés rhéologiques sont des indicateurs objectifs d'un produit que l'on peut tenter de relier aux analyses perceptives.

Ces paramètres doivent être assez précis pour différencier les produits étudiés deux à deux.

Précision terminologique : dans le domaine de l'analyse sensorielle, les données issues de mesures physiques ou de calculs sur ces mesures sont qualifiées "d'instrumentales". Le terme "objectives" regroupe ces données, mais également les réponses perceptives des experts qui deviennent après l'entraînement de véritables "outils de mesure". Dans notre cas d'étude, l'utilisation du terme "instrumental", directement dérivé de notre produit (instrument de musique) pourrait semer le doute et gêner la compréhension du lecteur. Nous avons donc décidé d'utiliser abusivement le terme "objectives" pour des données "instrumentales" et "perceptives" pour les données issues des experts.

#### 2.2.2.4 Corrélation et validation des causalités (Figure 2.3)

Cette étape a pour but de mettre en regard les deux types de données collectées dans les deux étapes précédentes :

- les données objectives (D.O.),
- les données perceptives (D.P.).

Cette étape utilise les outils de l'analyse de données. Nous avons limité notre étude à l'utilisation de la corrélation.

S'il existe une corrélation entre l'évolution des variables objectives et perceptives, la relation peut être inversée et former des règles de prédiction des données perceptives puis les préférences du consommateur en utilisant les cartographies de préférence.

Il faut signaler à ce niveau qu'il est nécessaire de prouver la causalité des liens entre les variables corrélées pour pouvoir utiliser la relation inverse. L'existence d'une corrélation, aussi bonne soit-elle, n'est jamais la preuve d'une relation de cause à effet. <sup>4</sup> Pour valider ces causalités, les outils de réalité virtuelle semblent être très adaptés car ils permettent une exploration large de l'espace de conception. Moins coûteux que le prototypage, et permettant de maîtriser chaque paramètre du modèle, ils permettront de vérifier les causalités des corrélations.

---

<sup>4</sup>Nous trouvons par exemple une bonne corrélation dans ces 10 dernières années entre la taille d'un enfant et la puissance des ordinateurs du laboratoire. Cela ne révèle, bien évidemment, aucune relation causale. La corrélation négative entre la durée de vie et la quantité de médicaments pour le coeur absorbée n'est en aucun cas une relation de cause à effet. Il est donc nécessaire de valider les corrélations avancées et présentes dans le cahier des charges.

### 2.2.3 Définition et validation du cahier des charges

Le cahier des charges doit interpréter de façon technique les besoins et les attentes du client. Il est donc le fruit de l'étude de la cartographie des préférences et des corrélations objectif/perceptif. Les descripteurs sensoriels ont permis de mettre en avant des caractéristiques des zones de préférences des clients. Ces descripteurs sensoriels ont eux-mêmes été évalués et corrélés à des données objectives du produit. Le cahier des charges doit rassembler ces informations, en les hiérarchisant par ordre de priorité et en indiquant les spécifications attendues du produit, du point de vue des données objectives du produit.

### 2.2.4 Optimisation

Après avoir défini ce que serait, d'un point de vue sensoriel, un "bon" produit pour l'utilisateur, il faut déterminer ses paramètres de conception. Pour cela, nous proposons d'utiliser l'approche par optimisation, pour concevoir un produit qui se rapproche le plus possible de la cible du cahier des charges donc de ce que le client attend. Le synoptique de l'approche par optimisation est présenté Figure 2.7.

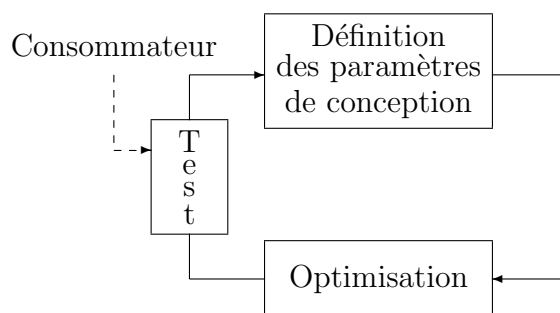


Figure 2.7: Optimisation

L'approche par optimisation est utilisée dans de nombreux domaines. <sup>5</sup>Pour Colette [COL 02], un problème de conception peut être exprimé sous la forme générale d'un *problème d'optimisation*, dans lequel on définit une fonction objectif, ou fonction de coût, que l'on cherche à minimiser par rapport à tous les paramètres concernés (les variables d'optimisation). Il s'agit donc de trouver le meilleur compromis entre répondre au mieux au cahier des charges et avoir le moins de pertes possible.

L'optimisation sera également validée par un test utilisateur. Le résultat de l'optimisation restant théorique, il faut contrôler sa validité en fabriquant le prototype du produit puis en le faisant tester par les consommateurs qui pourront alors le valider ou préciser leurs attentes pour définir un nouveau cahier des charges. Il est plus délicat d'utiliser dans

<sup>5</sup>en informatique, le code source d'un programme est optimisé pour le rendre plus rapide. En production, il est normal de chercher à optimiser le rendement, en gestion, des bases de données... Le but est de minimiser une perte de temps, d'énergie, d'argent, de ressources.

cette étape la réalité virtuelle car cette tâche s'adresse à des utilisateurs non entraînés, qui doivent tester le produit en situation d'usage.

C'est seulement une fois les paramètres de conception validés que le produit sera industrialisé, produit et mis sur le marché.

Les étapes de la démarche de conception que nous proposons vont maintenant être illustrées par l'étude que nous avons menée sur les branches d'embouchure de trompette.

## 2.3 Application à la trompette

Le produit que nous avons choisi d'étudier est un instrument de musique de type cuivre : la trompette. La figure 2.8 montre la démarche suivie pour l'application de la méthode à la trompette.

La partie concernant la définition du besoin, comprenant les tests hédoniques, l'espace sensoriel et la cartographie des préférences ne sera pas réalisée dans notre cas d'étude. Ces études nécessitent un très grand nombre de sujets et mobilisent des moyens très importants que nous n'avons pas déployés. Par exemple, l'image de marque d'un instrument joue un rôle important dans le choix d'un instrument. Des tests sur des instruments du commerce sont donc difficile à mettre en place puisque même gantés et les yeux bandés, certains trompettistes peuvent reconnaître l'instrument [THO 95].

Nous allons, dans la suite du chapitre, détailler les différentes étapes de la démarche de conception orientée client appliquée à la trompette. Notre objectif est de modifier "l'équilibre" général de la trompette en modifiant la branche d'embouchure, et caractériser perceptivement ces changements, pour repérer si des "équilibres" sont plus intéressants que d'autres par rapport au souhait du client.

### 2.3.1 Création de l'espace produit : Génération d'une famille de trompettes

Nous présentons dans ce paragraphe la façon dont nous avons paramétré notre produit, la trompette, et donc créé notre espace produit. Le choix de notre paramètre est basé tout d'abord sur la connaissance de l'instrument, sur la littérature le concernant et sur une facilité de fabrication.

Les principales variables de conception de l'instrument qui ont une influence sur le son sont :

- la géométrie interne du résonateur : la "perce" ;
- l'état de surface interne ;
- la qualité et la rigidité des assemblages ;



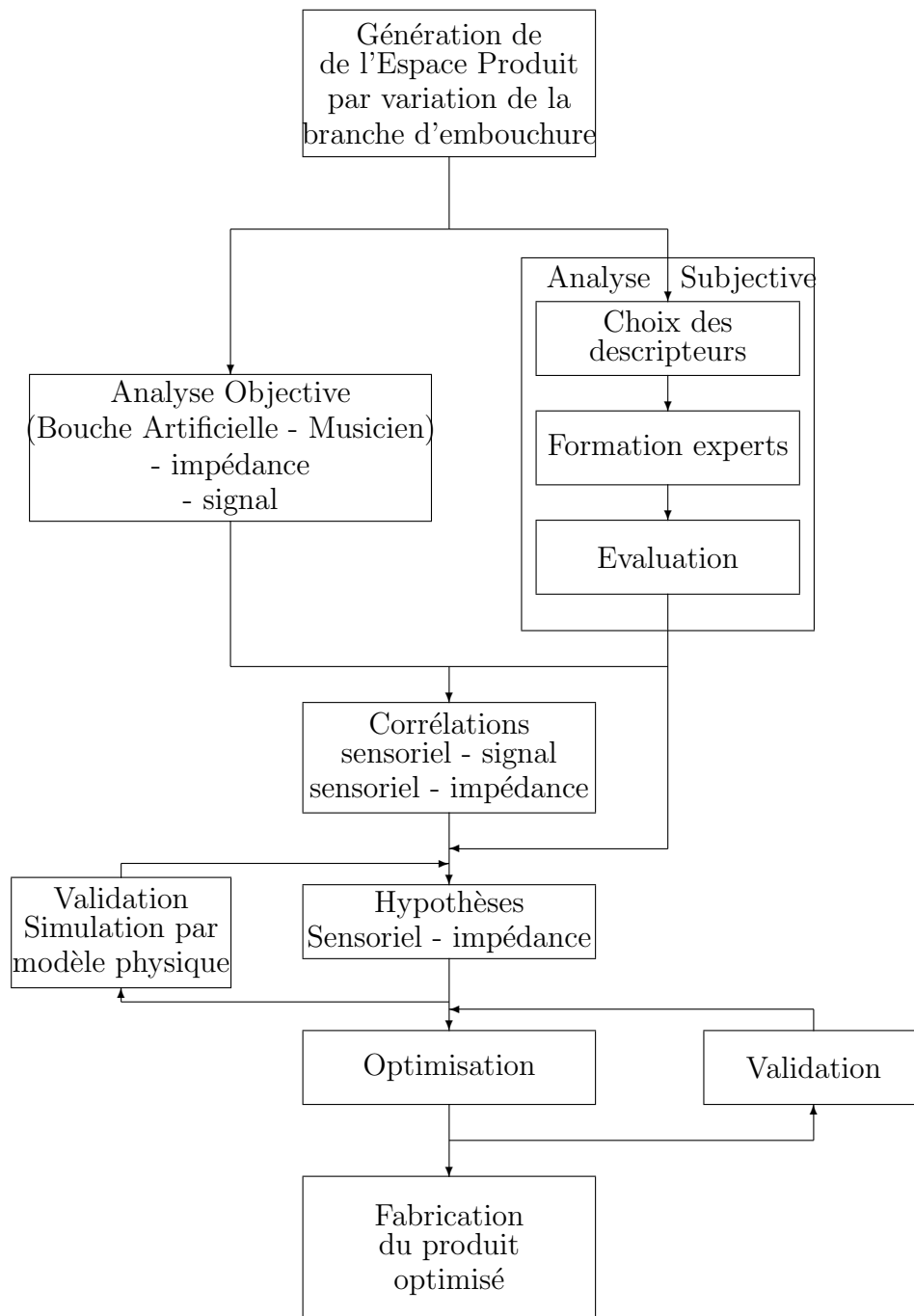


Figure 2.8: Les différentes étapes de la démarche de Conception Orientée Client appliquée à la trompette

- la nature du matériau et son moyen de mise en forme ;
- les jeux internes.

L'état de surface interne est dû au moyen de mise en forme du matériau ainsi qu'à l'âge et l'entretien de l'instrument. Choisir de travailler sur les matériaux signifierait de pouvoir concevoir des instruments semblables sur le plan géométrique, mais de matériaux différents, ce qui est très difficile d'un point de vue technique. Le point qui nous a semblé le plus important est la géométrie interne du résonateur, appelée perce de l'instrument. Dans cette géométrie, la forme du pavillon et celle de la branche d'embouchure semblent les plus influentes puisqu'elles représentent les endroits de variations les plus importantes de la perce. Pour des raisons techniques de fabrication, le choix s'est porté sur la branche d'embouchure, jouant un grand rôle par rapport au comportement acoustique de l'instrument.

La branche d'embouchure est la partie de l'instrument située entre l'embouchure (partie en contact avec le musicien) et la coulisse d'accord comme le montre la figure 2.9.

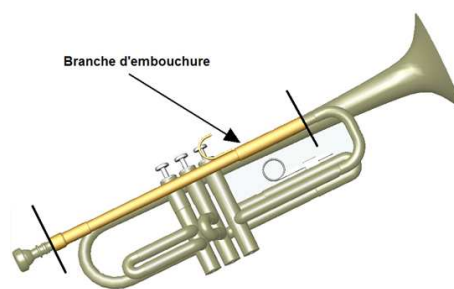


Figure 2.9: Branche d'embouchure

En se basant sur la mesure de profils internes de branches existantes (mesure à l'aide de calibres) [BUI 02], nous avons conçu une branche composée de 4 parties démontables, dont le profil interne de chaque partie est paramétrable (figure 2.10).

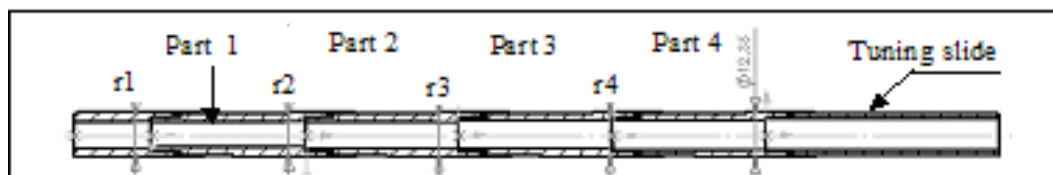


Figure 2.10: Branche paramétrable

Une branche d'embouchure paramétrable est ainsi constituée de 6 pièces filetées (filetage M16, pas = 1) :

- la pièce "embout" qui reçoit l'embouchure ;
- 4 pièces, repérées de "pièce 1" à "pièce 4", dont la géométrie interne diffère ;
- la pièce "coulisse" qui reçoit la coulisse d'accord de la trompette.

Les pièces 1 à 4 sont de même longueur (5.5cm) et peuvent donc être interchangeables. Ainsi, plusieurs pièces ont été fabriquées, de géométries internes différentes, permettant en conservant les pièces "embout" et "coulisse" et, en les assemblant aux autres pièces, de générer plusieurs profils internes, donc plusieurs branches. Le dessin de définition, commun aux 4 pièces centrales, est donné figure 2.11. Pour chaque pièce, seuls  $r_1$ , le rayon d'entrée ( $d_1 = 2r_1$ ), et  $r_2$ , le rayon de sortie ( $d_2 = 2r_2$ ), changent. Le tableau des rayons  $r_1$  et  $r_2$  pour chaque pièce conçue (tableau 2.1) est ensuite donné.

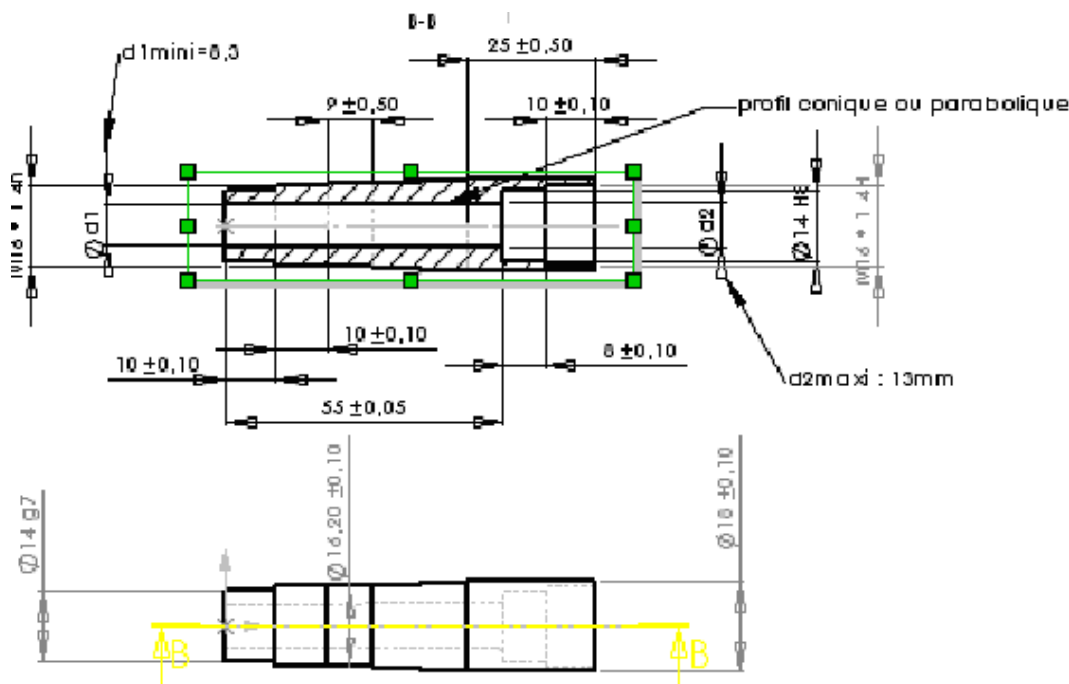


Figure 2.11: Dessin de définition de la pièce élémentaire constitutive des branches d'embouchure

<sup>6</sup> Les pièces ayant une géométrie externe rigoureusement identique, elles ont été ensuite codées pour les besoins des tests. Chacune a donc été gravée d'un caractère alphabétique propre à sa géométrie : deux pièces codées par une même lettre possèdent donc la même géométrie interne. Ainsi, une branche d'embouchure complète est codée par une suite de 4 lettres. Les rayons  $r_1$  et  $r_2$  de chaque pièce ont été choisis pour pouvoir former une copie des branches existantes ou créer des branches "extrêmes", comme l'enchaînement d'un cône et de 3 cylindres par exemple.

Comme dit précédemment, chaque pièce élémentaire est reconnaissable par l'examineur, grâce à la lettre gravée en surface. En revanche, les experts ne connaissent pas ce codage et ne peuvent donc pas distinguer les branches testées, ce qui est important pour faire des répétitions et tester la fiabilité des mesures sensorielles. Pour les tests, les branches sont montées sur la même trompette (modèle Bach, pavillon 43).

<sup>6</sup>La tolérance sur les rayons  $r_1$  et  $r_2$  est de 0.01mm

Code	Rayon Entrée r1 en mm	Rayon Sortie r2 en mm	Quantité de pièces fabriquées
A	4.64	4.64	3
B	4.64	4.7	1
C	4.64	5	1
D	4.64	5.45	1
E	4.64	5.825	1
F	4.7	5.5	1
G	5	5.05	1
H	5	5.5	1
I	5	5.7	1
J	5.05	5.7	1
K	5.45	5.5	1
L	5.5	5.5	1
M	5.5	5.7	1
N	5.5	5.825	1
O	5.5	6	1
P	5.7	5.7	1
Q	5.7	5.825	1
R	5.825	5.825	3
S	6	5.825	1

Tableau 2.1: Codage des pièces élémentaires constitutives des branches

L'espace produit étant généré, l'étape d'analyse perceptive de ces produits peut débiter.

### 2.3.2 Analyse perceptive : les descripteurs sensoriels de la trompette

Dans notre étude, nous avons choisi de proposer à tous les sujets la même liste de descripteurs, et pour être certains que les termes soient bien adaptés au produit étudié, les sujets eux-mêmes les ont générés lors d'une séance de verbalisation libre.

La première partie de la séance, réunissant 5 trompettistes professionnels, a été consacrée à l'exposition de notre axe de recherche et de l'objectif de l'étude puis en la définition de certains termes de l'analyse sensorielle, domaine a priori inconnu des musiciens. Dans la deuxième partie, l'exercice de verbalisation libre se présentait sous la forme d'un essai-discussion autour d'un ensemble d'instruments de qualité très variée. Dans un premier temps, chaque participant choisissait un instrument, se l'appropriait pendant quelques minutes, avant de venir exposer son ressenti aux autres. Cette phase de travail individuel est importante pour que chaque sujet réfléchisse de façon indépendante, pense à une liste de termes, pour ne pas se sentir pris au dépourvu lors de la discussion de groupe. C'est également un bon moyen d'empêcher un sujet de s'effacer devant une personne d'une plus grande aisance d'expression verbale, en permettant à l'animateur de le solliciter à tout moment.

Pour débiter la séance de groupe, chaque musicien est intervenu pour présenter l'instrument testé en expliquant ses qualités et ses défauts. De nombreux mots ont été générés pour tenter de répondre à la question : "Pour vous, qu'est-ce qui définit la qualité d'un instrument ?". En tant qu'animateurs, notre rôle dans la suite de la séance a été de conduire la discussion en prenant en compte les avis de chacun et en tentant de les harmoniser [ISO 94a], de trouver un consensus. Il est ressorti de cette discussion une liste de 14 attributs (tableau 2.2).

De cette liste d'attributs verbaux, nous avons éliminé les termes qui ne répondaient pas aux qualités d'un descripteur. L'attribut *homogénéité du timbre* par exemple, a été écarté car les trompettistes ne s'entendaient pas sur l'importance de l'instrument par rapport au musicien sur ce critère, qui serait très lié à l'effort fourni donc à la *facilité de jeu*. La facilité de jeu dépend elle-même de la justesse de l'instrument. Il est en effet plus difficile de jouer juste sur un instrument qui ne l'est pas. Il en est de même pour le *rendement*, lié à la *justesse* ou de la *richesse du timbre*, lié à l'intensité de jeu. Ainsi, les termes *Homogénéité du timbre*, *rendement*, *Richesse du timbre*, *Facilité de jeu* et *confort de jeu* n'ont pas été retenus à cause de leur caractère multimodal, agrégeant beaucoup de dimensions, donc décomposables en plusieurs descripteurs.

Attributs	Définitions
<i>Justesse</i>	Capacité à jouer les notes en accord avec un gamme de référence
<i>Homogénéité timbre</i>	"Similitude des sons produits sur toute la tessiture"
<i>Brillance timbre</i>	Qualité du son à être brillant, clair. (opposé à mat)
<i>Richesse timbre</i>	Présence de nombreuses harmoniques
<i>Rendement</i>	Rapport du son produit sur l'effort fourni
<i>Facilité de jeu</i>	Rend compte de l'effort à fournir pour obtenir ce que l'on veut
<i>Toucher</i>	Qualité de la note à être là où on l'a pensée
<i>Temps de réponse</i>	Temps écoulé entre l'effort fourni et le son perçu
<i>Largeur de son</i>	Liée à la diffusion dans la salle. Large != directif
<i>Centrage</i>	Vibration des lèvres attirée par la fréquence de résonance de l'instrument
<i>Flexibilité</i>	Facilité avec laquelle on peut changer de note
<i>Confort de jeu</i>	Instrument agréable à jouer, sans souffrance
<i>Esthétique</i>	Qualité de la trompette à être agréable à regarder
<i>Ergonomie</i>	Bonne prise en main, pas de douleur, prise en main naturelle
<i>Equilibre</i>	Tenue de l'instrument stable, pas de déséquilibre
<i>Mécanique pistons</i>	Bruit produit par l'actionnement des pistons, qualité perçue
<i>Prix</i>	Somme d'argent à dépenser pour acquérir le produit

Tableau 2.2: Attributs donnés par les trompettistes lors de la séance de verbalisation

La première qualité d'un descripteur est évidemment d'être pertinent. Or, nous ne nous intéressons qu'à ce qui s'écoute et aux retours proprioceptifs <sup>7</sup> sur la bouche par rapport au souffle du musicien. *Prix*, *Esthétique*, *Ergonomie*, *Equilibre* et *Mécanique Pistons*, bien que primordiaux dans le choix d'un instrument, sont des critères qui n'ont pas été retenus dans notre étude.

C'est sur la qualité "discriminant" du descripteur que nous avons éliminé le terme *Toucher* car, si tous les trompettistes utilisent ce terme, il n'a pas pour chacun la même signification [BEG 98]. Pour éviter une mauvaise interprétation de cet attribut, nous avons préféré le mettre de côté. Paraissant antagoniste à un bon *centrage* des notes, descripteur retenu, le terme *flexibilité* fut également rejeté.

Dans la dernière partie de la séance, les trompettistes avaient pour consigne de décrire une procédure d'évaluation pour chaque descripteur. Les définitions des termes se sont alors affinées. Les musiciens ont admis que la procédure pour tester la justesse de l'instrument se décomposait en deux étapes :

- la justesse générale de l'instrument ;
- la justesse des doigtés factices.

En effet, sur la trompette, une note peut être jouée avec plusieurs combinaisons de pistons comme le Mi qui peut être joué à vide(0) ou pistons 1 et 2 enfoncés(12). Un écart de hauteur trop important entre ces deux doigtés serait rédibitoire pour le choix de l'instrument.

<sup>7</sup>relatif à la sensibilité des muscles, des ligaments ou des os

En analysant les attributs énoncés, nous avons sélectionné avec l'aide de quelques experts disponibles, la liste de descripteurs suivante. Le tableau 2.3 résume les descripteurs choisis et les procédures d'évaluation relatives.

Descripteur	Définition	Echelle	Procédure
<i>Justesse</i>	Position relative des partiels les uns par rapport aux autres	faux/juste	arpège à vide
<i>Test du Mi</i>	Ecart de hauteur entre le doigté Mi(0) et le Mi(12)	faible/important	Mi(0)/Mi(12)
<i>Centrage</i>	Capacité de l'instrument à se recentrer sur la note lorsqu'on l'attaque légèrement à côté	mauvais/bon	Attaque du sol <sup>4</sup>
<i>Réponse</i>	Capacité de l'instrument à jouer immédiatement	mauvaise/bonne	Détaché
<i>Grave</i>	Aptitude de l'instrument à développer un palette de nuances importante dans le grave	restreinte/grande	<i>pp, mf, ff</i>
<i>Médium</i>	Aptitude de l'instrument à développer un palette de nuances importante dans le médium	restreinte/grande	<i>pp, mf, ff</i>
<i>Aigu</i>	Aptitude de l'instrument à développer un palette de nuances importante dans l'aigu	restreinte/grande	<i>pp, mf, ff</i>
<i>Timbre</i>	Sonorité propre à chaque instrument	mat/brillant	Comparaison / référence

Tableau 2.3: Liste des descripteurs utilisés

C'est la fin de la première étape : élaboration du profil sensoriel par une épreuve de verbalisation.<sup>8</sup>

### 2.3.3 Analyse perceptive : la formation des experts

Dans cette nouvelle partie, nous allons nous attarder sur la formation des experts en définissant tout d'abord qui sont les experts, puis, à quelle tâche nous les avons entraînés et dans quel but.

#### 2.3.3.1 Les experts en trompette

Les 10 musiciens<sup>9</sup> contactés sont des trompettistes professionnels de la région des Pays de la Loire, possédant connaissance et maîtrise technique de l'instrument. Les musiciens

<sup>8</sup>Dans la suite de l'étude, on notera respectivement *Aigu*, *Grave*, *Médium* les descripteurs *Palette sonore dans le registre aigu, grave et médium*.

<sup>9</sup>3 professeurs de Conservatoire, 6 professeurs d'Ecole de Musique et 1 musicien semi-professionnel, d'influences diverses (formation classique, jazz, harmonie...)

sont pour la plupart des passionnés : il n'a donc pas été difficile de s'assurer de leur motivation tant pour le développement de leur instrument de prédilection que pour l'apport personnel de cette nouvelle expérience. En plus de se rendre disponibles pour les différents tests, ces trompettistes présentaient toutes les aptitudes souhaitables à l'entraînement : la mémoire des propriétés sensorielles, des connaissances en musique et plus particulièrement autour de la trompette, la faculté de rédiger des notes claires et une bonne aptitude à communiquer, puisqu'enseignant pour la plupart cet instrument.

Avec leurs compétences musicales, il nous restait à procéder à cette séance d'entraînement pour leur apprendre à évaluer les instruments selon les descripteurs choisis. En général, lors du choix d'un instrument, il est jugé dans son ensemble. Il est totalement nouveau pour eux d'avoir à évaluer un instrument selon un critère particulier, de devoir dissocier les qualités ou défauts de l'instrument et surtout de faire abstraction du côté hédonique, c'est-à-dire du fait qu'ils aiment ou qu'ils n'aiment pas le produit.

Désirant changer le minimum de paramètres d'une trompette à l'autre, nous avons modifié les branches sur une même trompette, ce qui ne permettait pas de présenter deux produits à comparer. C'est donc une épreuve de cotation qui a été proposée aux sujets. Dans cette épreuve, la première étape consiste à présenter les descripteurs, leur définition et leur procédure de test. Dans un deuxième temps, les bornes des échelles sont également exposées pour que le sujet puisse estimer l'étendue de l'échelle. Ensuite, des échantillons sont présentés un par un et le sujet doit attribuer une note pour chaque descripteur, en le plaçant sur une échelle.

### 2.3.3.2 L'épreuve de formation des experts trompettistes

Ne pouvant prédire l'effet de nos modifications de branche sur l'instrument complet, et ce test étant la première approche sensorielle pour les trompettistes, nous l'avons voulu le moins difficile possible. Ainsi, 4 branches de géométrie très différentes ont été sélectionnées (figure 2.12):

- Branche codée AAAE : section cylindrique constante sur les 3 premiers tronçons puis divergente sur la dernière partie de la branche ;
- Branche codée DKOS : section à conicité variable, continue et divergente sur les 3 premiers tronçons et convergente sur la dernière partie de la branche ;
- Branche codée IFJN : section à conicité variable, avec des discontinuités de section ;
- Branche codée CHMQ : copie de la branche du commerce "Bach-argent".

Seule la branche CHMQ est une copie d'une branche du commerce. Les autres branches ont volontairement une géométrie "extrême", le but étant de tester l'aptitude de nos sujets à être expert et non pas d'évaluer des instruments du commerce.



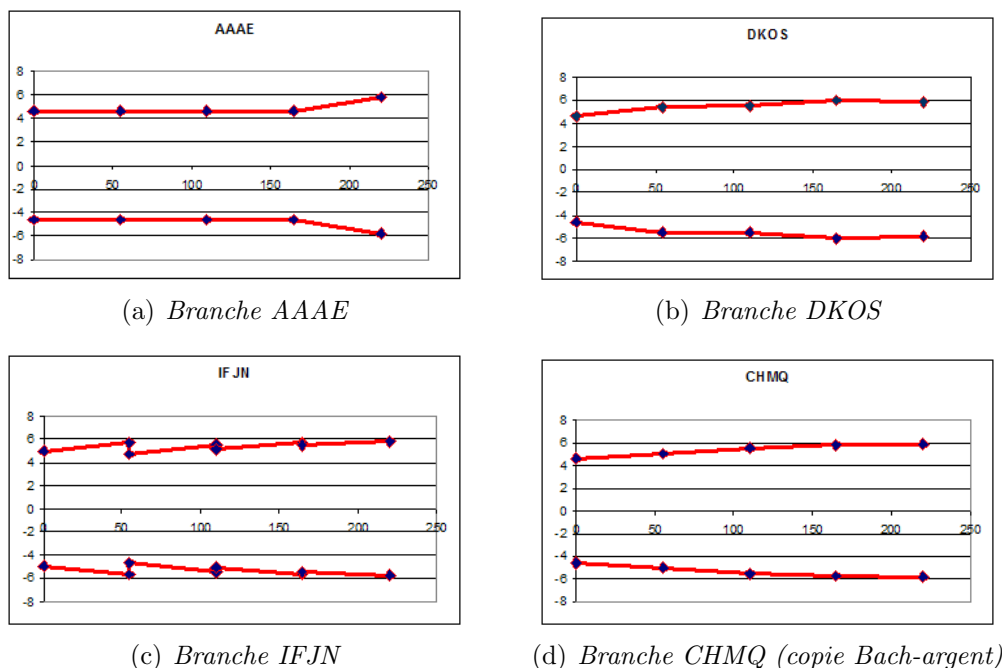


Figure 2.12: Géométrie interne des 4 branches d'embouchure retenues pour la première série de test. Rayon interne en fonction de la perce de la branche d'embouchure en mm.

Pour tester leur répétabilité et juger de leur fiabilité, nous avons présenté chaque branche 3 fois, sans bien sûr les en informer.

La première phase consiste à expliquer chaque descripteur à l'expert, en lui présentant des trompettes caractéristiques des points extrêmes de l'échelle (points d'ancrages), de façon à être bien certain que l'expert a compris ce qu'il va devoir juger et quelle est l'amplitude de l'échelle sur laquelle il va devoir noter. Ces points d'ancrage ont été déterminés par Jean-François Petiot, lui-même trompettiste. On trouvera en Annexe A la fiche d'évaluation présentée aux experts lors de cette phase, indiquant les points d'ancrages de chacun des descripteurs. Le tableau 2.4 indique les branches utilisées pour définir les extrémités de chaque échelle.

Descripteur	Extrémités des échelles	
<b>Justesse</b>	Faux : RRAA	Juste : branche d'origine
<b>Test du Mi</b>	Aucune référence, notation laissée à l'appréciation de l'expert	
<b>Centrage</b>	Mauvais : AARR	Bon : Degironde M
<b>Réponse</b>	Mauvaise : BIMN	Bonne : Degironde M
<b>Grave</b>	Aucune référence, notation laissée à l'appréciation de l'expert	
<b>Médium</b>		
<b>Aigu</b>		
<b>Timbre</b>	L'expert se réfère à son instrument personnel	

Tableau 2.4: Liste des instruments utilisés pour définir les bornes des échelles présentées

La seconde phase constitue le test en lui-même : l'examineur présente les trompettes les unes après les autres. Les 4 trompettes étant répliquées 3 fois, 12 instruments sont à tester. Le plan de présentation est défini au préalable, l'expert n'en ayant pas connaissance. La répétabilité de son jugement est ainsi testée. Le plan de présentation est donné dans le tableau 2.5.

Pour chaque instrument présenté, le sujet a pour consigne de noter ses premières impressions. En effet, au bout d'approximativement une minute, son appréciation change puisqu'il s'est habitué à l'instrument et corrige instinctivement les défauts. Pour une trompette qui lui paraît fautive à première vue, il arrivera au bout de quelques instants à jouer ce qu'il souhaite entendre et non ce que mécaniquement la trompette aurait fourni avec la source initiale, c'est-à-dire son masque a priori. Le fait de jouer peu de temps chaque trompette permet aussi d'éviter le phénomène de fatigue, la séance durant environ 1 heure.

Ordre	Branche
1	AAAE
2	DKOS
3	CHMQ
4	IFJN
5	DKOS
6	IFJN
7	AAAE
8	CHMQ
9	IFJN
10	CHMQ
11	DKOS
12	AAAE

Tableau 2.5: Plan de présentation des branches

### 2.3.3.3 Analyse des résultats de la formation des experts

#### Présentation des résultats

Pour la suite du rapport, les experts sont dénommés expert1 à expert10 pour des soucis de confidentialité des résultats <sup>10</sup>.

Les résultats de la première séance d'évaluation subjective sont présentés sous forme du tableau 2.6.

La note de l'évaluation fournie par l'expert est la distance à l'origine en cm, sur une échelle de longueur totale 10 cm (Figure 2.13).

<sup>10</sup>La numérotation n'a aucun rapport avec l'ordre alphabétique.

Branches	Descripteur 1			Descripteur ...		
	Notes	Moyenne	Rg	Notes	Moyenne	Rg
Branche 1	$x_1^1$	$\bar{x}_1^j$	$r_1$	$x_1^1$	$\bar{x}_1^j$	$r_1$
	$x_1^2$			$x_1^2$		
	$x_1^3$			$x_1^3$		
Branche 2	$x_2^1$	$\bar{x}_2^j$	$r_2$	$x_2^1$	$\bar{x}_2^j$	$r_2$
	$x_2^2$			$x_2^2$		
	$x_2^3$			$x_2^3$		
Branche 3	$x_3^1$	$\bar{x}_3^j$	$r_3$	$x_3^1$	$\bar{x}_3^j$	$r_3$
	$x_3^2$			$x_3^2$		
	$x_3^3$			$x_3^3$		
Branche 4	$x_4^1$	$\bar{x}_4^j$	$r_4$	$x_4^1$	$\bar{x}_4^j$	$r_4$
	$x_4^2$			$x_4^2$		
	$x_4^3$			$x_4^3$		

Tableau 2.6: Forme du tableau de résultats de la formation des experts

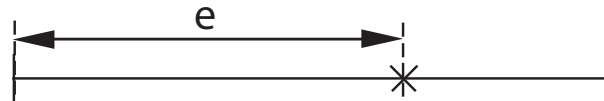


Figure 2.13: Mesure de la note e sur une échelle de 10 cm

Pour chaque branche testée, les notes à chaque présentation de la branche sont indiquées. La moyenne de ces notes est présentée en 3<sup>e</sup> colonne du tableau 2.6, ce qui nous permet de faire un classement sur chaque descripteur. Les 10 tableaux-résultats (1 par expert) se trouvent en annexe B.

Toutes les données récoltées vont nous permettre d'évaluer les capacités de chaque candidat et du groupe en général.

### 2.3.3.3.1 Homogénéité du panel

Pour pouvoir utiliser les méthodes statistiques faisant appel à des moyennes, il faut tout d'abord s'assurer qu'il est judicieux de moyenner les données de tous les experts, donc s'assurer de l'homogénéité du panel. Un sujet peut ne pas avoir compris une consigne ou avoir un avis divergent du reste du panel et nous devons le repérer.

Pour savoir si notre panel d'experts est homogène, les individus (les experts) sont représentés dans le plan factoriel par une analyse en composantes principales non normée sur la matrice produits/sujets des notes moyennes de chaque sujet. Les résultats par descripteurs sont donnés Figure 2.14.

Sur certains descripteurs, un bon consensus est mis en avant (Justesse, Mi). Sur d'autres par contre (centrage, grave), les jugements partent "dans tous les sens", ce qui signifie que les experts n'ont pas noté les instruments de la même manière. Cela est sans doute dû à une difficulté de notation trop grande sur certains descripteurs, soit par confu-

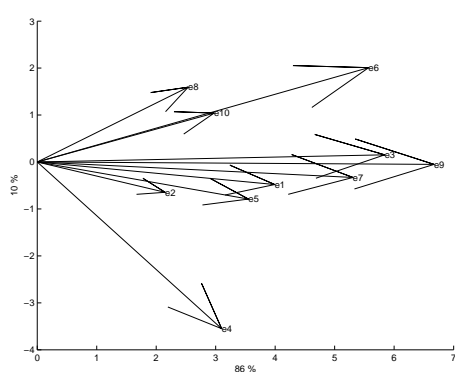
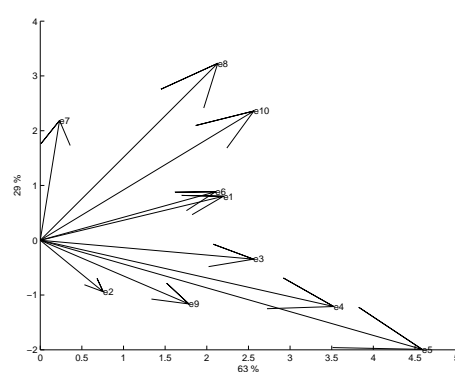
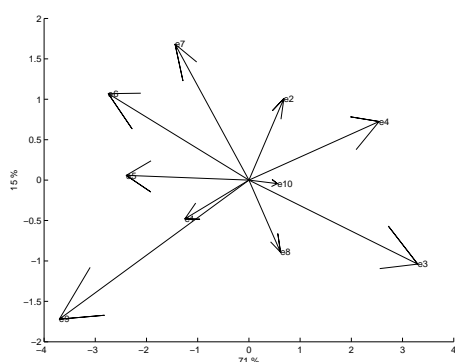
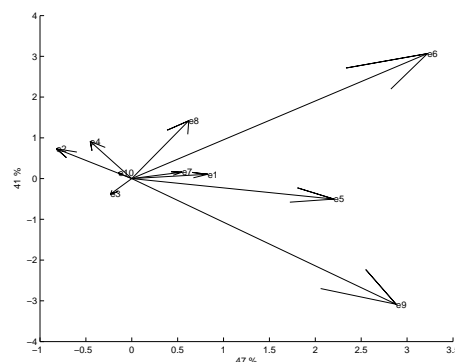
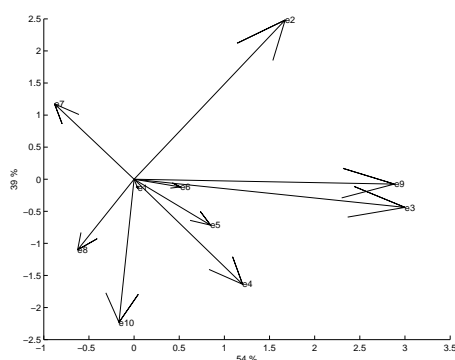
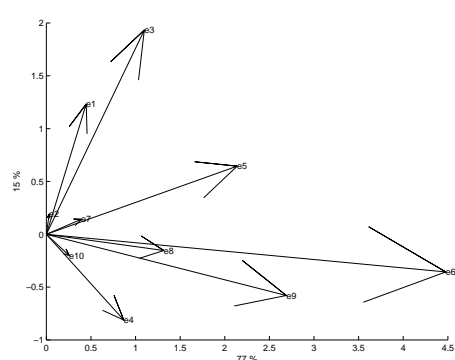
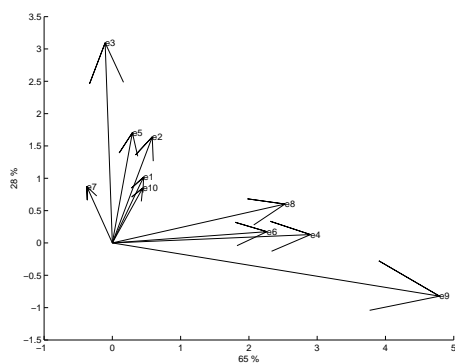
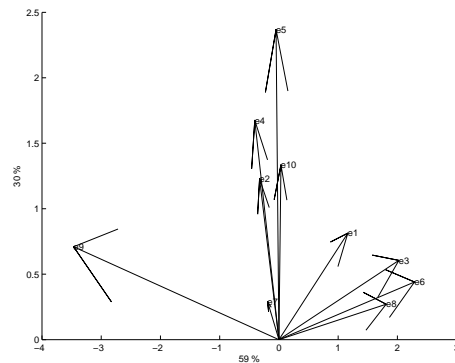
(a) *Justesse*(b) *Mi*(c) *centrage*(d) *Réponse*(e) *Grave*(f) *Médium*(g) *Aigu*(h) *Timbre*

Figure 2.14: ACP produit / sujet par descripteur des notes moyennes de chaque sujet

sion, soit par incompréhension du terme.

Pour "quantifier" l'homogénéité du panel par descripteur, nous proposons de comparer les pourcentages d'inertie du premier axe de l'analyse en composantes principales mais normée cette fois. Les résultats sont donnés dans le tableau 2.7.

Descripteur	Justesse	Mi	Centrage	Réponse	Grave	Médium	Aigu	Timbre
% inertie	81%	57%	60%	45%	50%	52%	49%	46%

Tableau 2.7: Pourcentage d'inertie sur le premier axe de l'ACP normée sur les résultats de la séance d'entraînement

Ces résultats indiquent une bonne performance des sujets sur le descripteur Justesse (81% d'inertie sur le 1<sup>er</sup> axe). Le panel semble par contre beaucoup moins homogène sur les descripteurs Aigu, Timbre et Réponse ( < 50% d'inertie).

### Répétabilité des experts : ANOVA à 1 facteur

Pour valider les sujets au rôle d'expert, nous devons tester leur capacité à émettre un jugement répétable. Ceci est possible grâce aux trois réplifications, donc trois présentations de chaque branche durant le test.

Nous ne connaissons pas a priori l'effet des modifications apportées à la branche sur l'évaluation du produit, ni même si celui-ci est perceptible. Par l'analyse de la variance à 1 facteur, nous tentons de répondre à la question "les produits sont-ils significativement différents ?", c'est-à-dire, "Y a-t-il un effet produit sur le descripteur x pour l'expert y ?".

Pour nous permettre de comparer nos produits, et pour éviter de se lancer dans de longs calculs de comparaisons des moyennes deux à deux, on utilise l'analyse de la variance (ANOVA). Cette méthode de l'analyse des données, développée par le statisticien R.Fisher, a pour objectif d'étudier l'influence de données expérimentales sur des variables quantitatives. Elle se résume en une comparaison multiple de moyennes de différents échantillons [MAT 04]. La variance est par définition dans cette méthode la somme de la variance des moyennes et de la moyenne des variances. Pour calculer la somme de la variance des moyennes (BSS), appelée variance inter-échantillonnaire, on utilise la formule :

$$BSS = r \sum_{i=1}^k (\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad (2.1)$$

avec k le nombre de produits, r le nombre de répétitions,  $\bar{x}_i$  la moyenne des notes des r répétitions pour le produit i et  $\bar{x}$  la moyenne des  $\bar{x}_i$  pour l'ensemble des produits.

Pour calculer la moyenne des variances (ESS), appelée variance intra-échantillonnaire ou variance résiduelle, on relève pour chaque présentation d'échantillon son écart à la

moyenne en suivant la formule :

$$ESS = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^k (x_{ji} - \bar{x}_i)^2 \quad (2.2)$$

avec  $x_{ji}$  la note attribuée à l'échantillon  $i$  à la présentation  $j$ .

La somme totale des carrés (TSS) est donc la somme des deux éléments précédents :

$$TSS = BSS + ESS \quad (2.3)$$

Dans notre étude, 4 branches ( $k = 4$ ) ont été notées 3 fois chacune par un expert ( $r = 3$ ), sur 8 descripteurs. Le but est de savoir si les modifications apportées aux instruments entraînent un changement perceptible par le musicien. Nous voulons donc tester l'effet produit, notre produit étant la trompette et plus particulièrement la partie paramétrable de l'instrument : la branche. C'est donc une analyse de la variance à 1 facteur (seule la branche intervient).

Exemple : expert 1 sur descripteur *justesse* :

Branches	Justesse	
	Notes	Moyenne
AAAE	3.1	3.033
	3	
	3	
DKOS	6	7
	8.7	
	6.3	
IFJN	9.2	7.1
	6.2	
	5.9	
CHMQ	8.2	8.4
	8.8	
	8.2	

Tableau 2.8: Notes de l'expert 1 sur le descripteur *justesse*

Les résultats sont en général présentés dans une table d'analyse de la variance (Tableau 2.9) ( $k$  le nombre de produits dans l'espace produit et  $r$  le nombre de répétitions,  $n$  est le nombre total de produits présentés donc  $n=k*r$ ).

Dans notre exemple :

Il faut ensuite tester statistiquement la significativité de l'effet produit en posant notre hypothèse de départ :

$H_0$  : "Les produits testés n'ont aucune influence sur les jugements émis par l'expert."

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Moyenne quadratique
entre produit	BSS	k-1	BSS/(k-1)
Résidu	ESS	n-k	ESS/(n-k)
Totale	TSS	n-1	TSS/(n-1)

Tableau 2.9: Table d'analyse de la variance à 1 facteur

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Moyenne quadratique
entre produit	48.55	3	16.18
Résidu	11.287	8	1.254
Totale	59.837	11	5.62

Tableau 2.10: Table d'analyse de la variance à 1 facteur sur notre exemple

Pour vérifier l'existence d'une différence significative entre les produits, on va utiliser la statistique de Fisher. Les rapports des variances sont calculés :

$$F = \frac{BSS/(k-1)}{ESS/(n-k)} \quad (2.4)$$

Dans notre cas,  $F = 12.9$ . Cette valeur est ensuite comparée à la valeur relevée dans les tables de Fisher pour un risque de  $\alpha\%$ , (choisi généralement à 5%) avec k-1 et n-k degrés de liberté.

$$F_{5\%(3,9)} = 3.86 \quad (2.5)$$

Si  $F_{obs} > F_{5\%(3,9)}$ , alors, l'hypothèse de départ  $H_0$  ne peut pas être rejetée : le risque de rejeter à tort  $H_0$  est supérieur à 5%. Il est dans ce cas impossible de conclure que les produits sont significativement différents. Dans la cas contraire, les experts ont perçu des différences sur le critère étudié; il y a alors un "effet produit" et le risque de rejeter à tort  $H_0$  est inférieur à  $\alpha\%$ . Ici,  $3.86 < 13.45$  signifie que pour le descripteur "justesse", l'expert 1 a bien jugé les produits comme significativement différents.

Pour présenter un seuil significatif de perception des différences, nous avons inversé le test pour faire figurer dans le tableau 2.11 les résultats sous la forme de la p-value. La p-value est la valeur de  $\alpha$  pour laquelle le test devient significatif, c'est-à-dire le risque qu'il faut choisir pour avoir un effet produit. Une p-value faible signifie donc une bonne différenciation des produits. Pour chaque expert et pour chaque descripteur, une case vide correspond à l'absence d'effet produit pour un risque inférieur à 15%. Les cases remplies correspondent à un effet produit, au risque inscrit dans ces cases, les cases grisées étant celles où l'effet est présent pour un risque inférieur à 5%.

Ce tableau montre très clairement que le descripteur *justesse* a permis à tous nos experts de différencier les produits avec un risque faible, exception faite de l'expert 5. Ce

Experts	Justesse	Mi	Centrage	Réponse	Grave	Médium	Aigu	Timbre
Expert 1	0.2%			6.4%				2.3%
Expert 2	4.7%							
Expert 3	0.0%							
Expert 4	0.7%	5.0%			9.5%		13.1%	
Expert 5	11.8%	12.7%						
Expert 6	3.0%			1.4%				6.3%
Expert 7	0.0%							
Expert 8	0.3%	0.2%		4.4%			8.0%	1.0%
Expert 9	0.0%		0.4%	11.8%			3.9%	4.2%
Expert 10	4.5%	5.8%						

Tableau 2.11: Résultats ANOVA à 1 facteur

descripteur semble donc le plus discriminant. Le fait qu'il y ait de nombreuses cases vides, notamment sur les descripteurs *Médium*, *grave* et *centrage*, peut s'expliquer par 3 raisons :

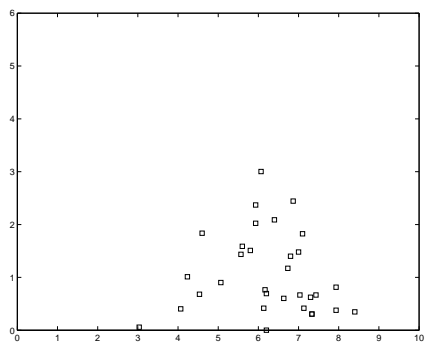
- les produits choisis ne sont pas assez différents pour que l'on puisse détecter un changement sur ces descripteurs. Les instruments récoltent tous à peu près les mêmes notes. Il est possible que le changement de la branche d'embouchure n'influence pas ces descripteurs. Donc les produits sont mal choisis.
- la mauvaise répétabilité d'un expert engendre des erreurs du même ordre que les changements provoqués par les modifications de la branche. Un écart-type trop important pour une branche donnée ne permet pas de dire si les instruments sont différents ou pas. Cette raison est imbriquée avec la première.
- la procédure utilisée pour évaluer le descripteur ne permet pas de mettre en évidence les différences entre produits.

Les figures 2.15 représentent l'écart-type des notes données par un expert par rapport à la moyenne des notes par branche. Une bonne répétabilité se traduit par des points proches de l'axe des abscisses. Cette représentation permet aussi de voir comment les experts ont utilisé l'échelle.

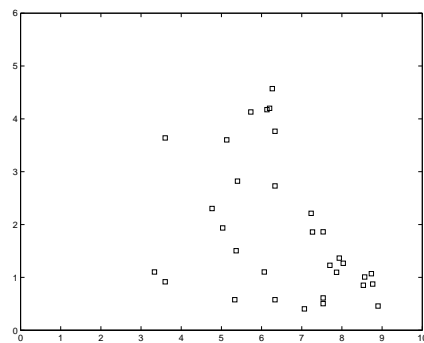
Les experts 1, 8 et 10 semblent les plus répétables. Les experts 9 et 6 ont bien utilisé toute l'échelle mais semblent peu répétables. Nous avons représenté ici les notes sur tous les descripteurs, sans écarter ceux qui ont pu poser des problèmes de compréhension par exemple.

Si l'on garde un risque de 5%, il n'y a pour les descripteurs *grave* et *médium* pas d'effet produit pour aucun des experts. Cela signifie que les experts n'ont pas différencier les instruments sur ces 2 descripteurs. Il n'est donc pas nécessaire d'approfondir par des comparaisons entre instruments deux à deux qui ne donneraient pas de résultat significatif.

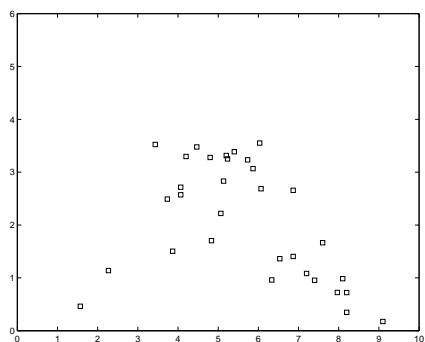




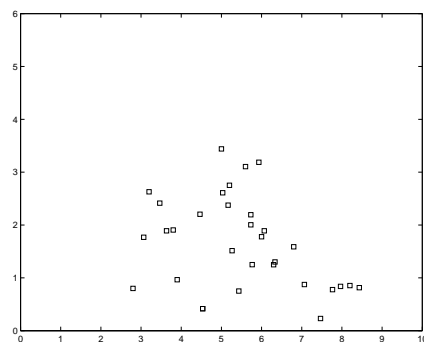
(a) Expert 1



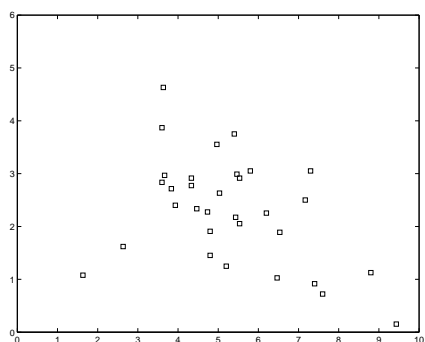
(b) Expert 2



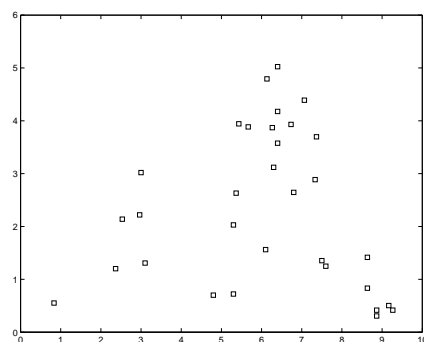
(c) Expert 3



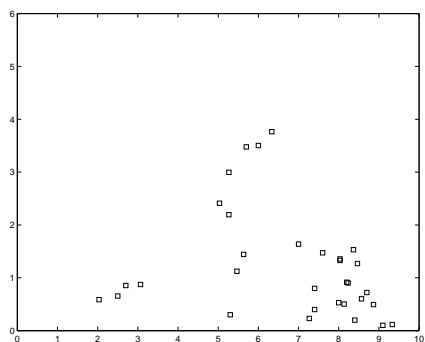
(d) Expert 4



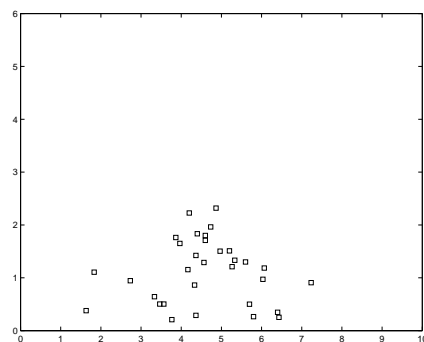
(e) Expert 5



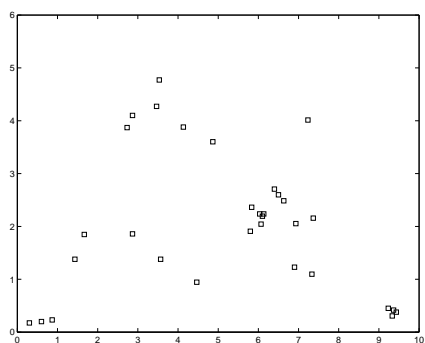
(f) Expert 6



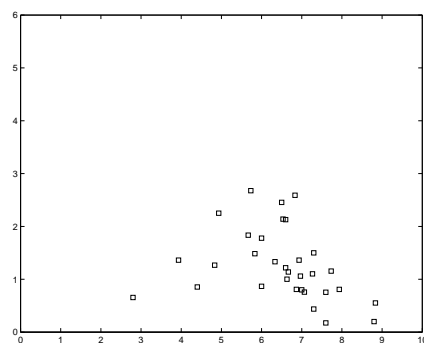
(g) Expert 7



(h) Expert 8



(i) Expert 9



(j) Expert 10

L'analyse des résultats sur ces descripteurs s'arrête donc là.

Nous allons compléter cette première analyse pour les 6 autres descripteurs, par le test de Student à risque modifié. Il s'agit d'un test de comparaison de moyennes deux à deux dont l'objectif est de savoir quels produits sont considérés par les experts comme identiques ou comme différents. Nous sommes dans le cas d'échantillon appariés (les mêmes sujets testent tous les produits que l'on compare). Pour chaque paire de trompettes, et pour chaque descripteur, la valeur absolue de la différence des moyennes est comparée à la PPDS (Plus Petite Différence Significative), donnée par la formule 2.6.

$$PPDS = t_{(p-1).(s-1); \frac{2\alpha}{p(p-1)}} \cdot \sqrt{\sigma^2 \cdot \frac{2}{s}} \quad (2.6)$$

avec

- $t_{(p-1).(s-1); \frac{2\alpha}{p(p-1)}}$  : variable de Student pour un niveau de probabilité  $\frac{2\alpha}{p(p-1)}$  et  $(p-1).(s-1)$  degrés de liberté ( $p$  = nombre de produits,  $s$  de sujets) ;
- $\sigma^2$  la variance résiduelle  $ESS/(n-k)$ .

Si la valeur absolue de la différence des moyennes est supérieure à la PPDS, les deux instruments sont significativement différenciés au seuil  $\alpha$ .

Reprenons l'exemple de l'expert 1 sur le descripteur *justesse* pour la paire AAAE-DKOS.

$$PPDS = t_{27; \frac{1}{120}} \cdot \sqrt{1.254 \cdot \frac{2}{10}} \quad (2.7)$$

Dans la table de student, on lit :

$$T_{(27,1/120)} = 2.85 \quad (2.8)$$

La différence des moyennes de AAAE et DKOS sur le descripteur *justesse* est de 3.97. Donc, la paire AAAE-DKOS de l'expert 1 sur la *justesse* est significativement différente. Les résultats pour ce descripteur sont donnés sous la forme d'un tableau contenant le nombre d'experts ayant un T significatif (donc ayant différencié les trompettes) sur cet attribut.

Ce tableau nous montre que la branche AAAE a été bien distinguée des trois autres branches. Par contre, peu de trompettistes ont distingué les 3 autres branches entre-elles. Pour les résultats sur tous les descripteurs, voir Annexe C. L'effet produit sur le descripteur *justesse* est donc dû uniquement à la branche AAAE qui est très fausse et qui se distingue des 3 autres.

Nous avons, par cette première analyse, trouvé sur quels descripteurs les experts sont répétables et discriminants. Nous avons également mis en avant la particularité de la

Justesse	AAAE	DKOS	IFJN	CHMQ
AAAE	-	7	7	9
DKOS		-	1	2
IFJN			-	2
CHMQ				-

Tableau 2.12: Résultats du test de la plus petite différence significative entre 2 produits sur l'attribut *justesse*

branche AAAE par rapport aux 3 autres. De plus, cette étude statistique nous a permis de déceler des descripteurs peut-être mal adaptés à l'épreuve puisque non discriminants. Nous en reparlerons par la suite.

En évaluation sensorielle, il y a souvent au moins deux facteurs : le facteur "produit", que l'on vient de tester, et le facteur "expert", c'est-à-dire, "Est-ce que les experts perçoivent les différences de la même façon ?". Si la différence est perçue mais que les tendances des experts sont complètement opposées, nous devons comprendre pourquoi.

"L'effet produit" est présent pour certains descripteurs et pour certains experts. Maintenant, il nous faut regarder s'il y a globalement, c'est-à-dire au niveau du groupe d'experts, un effet de la branche.

### 2.3.3.3.2 Analyse de la variance à 2 facteurs

L'analyse de la variance à 2 facteurs va nous permettre de trouver quelle est la part de variation due au trompettiste et celle due aux branches. Comme dans la première méthode, on décompose la variance. PSS est la variance entre les produits, SSS est la variance entre les sujets, ISS est la variance entre les échantillons pour l'interaction et RSS est la variance résiduelle. Elles se définissent de la sorte :

$$\begin{aligned}
 PSS &= rs \sum_{j=1}^k (\bar{x}_{bj} - \bar{x})^2 \\
 SSS &= rk \sum_{i=1}^s (\bar{x}_{ei} - \bar{x})^2 \\
 ISS &= r \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k (\bar{x}_{eibj} - \bar{x}_{bj} - \bar{x}_{ei} + \bar{x})^2 \\
 RSS &= \sum_{i=1}^s \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^r (x_{eibjr} - \bar{x}_{eibj})^2
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

avec

- $\bar{x}_{bj}$  la moyenne des notes moyennes de chaque expert pour la branche j ;
- $\bar{x}_{ei}$  la moyenne des notes moyennes de chaque branche pour l'expert i ;
- $\bar{x}_{eibj}$  la moyenne des notes données par l'expert i à la branche j ;
- $x_{eibjr}$  la note donnée par l'expert i à la branche j à la répétition r.

La table d'analyse de la variance devient alors :

Le test de Fisher sur les produits ( $F_p$ ), sur les sujets ( $F_s$ ) et les interactions ( $F_i$ ) est le rapport des moyennes quadratiques respectives sur la moyenne quadratique résiduelle.

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Moyenne quadratique
Produits	PSS	k-1	PSS/(k-1)
Sujets	SSS	s-1	SSS/(s-1)
Interaction	ISS	(p-1)(s-1)	ISS/(k-1)(s-1)
Résidu	RSS	ks(r-1)	RSS/ks(r-1)
Totale	TSS	ksr -1	TSS/ksr -1

Tableau 2.13: Table d'analyse de la variance à 2 facteurs

On compare ensuite selon l'effet recherché au F lu dans la table de Fisher-Snedecor :

- pour l'effet produit,  $F_{\alpha, (k-1, ks(r-1))}$  ;
- pour l'effet sujet,  $F_{\alpha, (s-1, ks(r-1))}$  ;
- pour l'interaction produit/sujet,  $F_{\alpha, ((k-1)(s-1), ks(r-1))}$ .

Dans notre étude,  $k = 4$ ,  $r = 3$  et  $s = 10$ . On regarde donc la valeur de  $F_{5\%(3,80)}$  (2.72),  $F_{5\%(9,80)}$  (1.99),  $F_{5\%(27,80)}$  (1.63) à comparer. On note dans le tableau suivant les résultats des tests significatifs.

	<i>Justesse</i>	<i>Mi</i>	<i>Centrage</i>	<i>Réponse</i>	<i>Aigu</i>	<i>Timbre</i>
Effet produit	<0.1%	<0.1%	N.S.	N.S.	<0.1%	1.8%
Effet sujet	<0.1%	0.1%	0.7%	<0.1%	<0.1%	3.4%
Interaction Produit/Sujet	0.6%	N.S.	3.7%	N.S.	N.S.	N.S.

Tableau 2.14: Valeur de la statistique de Fisher pour l'analyse de la variance à 2 facteurs

La première remarque concernant ces résultats est l'absence d'effet produit pour le groupe, sur les descripteurs *Centrage* et *Réponse*, qui signifie que sur ces dimensions, le groupe d'expert n'a pas pu distinguer les instruments. Cela confirme le résultat du paragraphe précédent, sur l'analyse de la variance à un facteur où seul un expert (Expert 9) avait réussi à distinguer les trompettes pour un risque de 5%. Ces descripteurs semblent donc mal adaptés à notre étude. Plusieurs explications possibles à cela :

- soit les experts ne sont pas encore assez précis ou n'ont pas utilisé la bonne procédure pour évaluer ce descripteur. Cette explication semble peu probable car leur répétabilité (tableau 2.7) sur cette dimension n'est pas singulière par rapport aux autres descripteurs.
- soit les produits choisis, donc, les 4 branches ne présentaient pas de différence sur cette dimension,
- cela revient à dire que la branche d'embouchure n'intervient pas ou trop peu dans la perception du centrage.

Pour quelque raison que ce soit, il n'est de toute façon pas judicieux de garder ces descripteurs. Ajoutons aux remarques précédentes l'ambiguïté de ces termes *centrage*, qui,

après discussion avec les musiciens, ne sont pas définis de la même façon par chacun et se confondent même entre eux. Au descripteur *Réponse*, certains interprétaient *Centrage* et vice et versa (ambiguïté déjà présente dans [BEG 98]), c'est pourquoi les descripteurs *Réponse* et *Centrage* ont été éliminés pour la suite de l'étude.

La deuxième remarque porte sur la *justesse*. Il y a un très fort effet produit, donc les instruments sont perçus comme différents, ce qui confirme les résultats précédents (7 experts sur 10 avaient un effet produit sur ce descripteur). Ce très fort effet produit est dû à la présence de la branche AAAE, très fausse, qui se distinguait très bien des 3 autres. Le test de Fisher par rapport aux sujets montre également que les experts ont perçu globalement les mêmes dissimilarités entre les produits pour ce critère. Par contre, on constate une faible interaction produit/sujet, qui est le signe d'un manque d'entraînement des experts puisque l'effet du sujet varie selon le produit présenté. Sur le schéma 2.16, les notes données par l'expert 2 ont une tendance complètement opposée à celles de l'expert 6. Les différences sont donc perçues mais pas de la même façon. Au regard des résultats

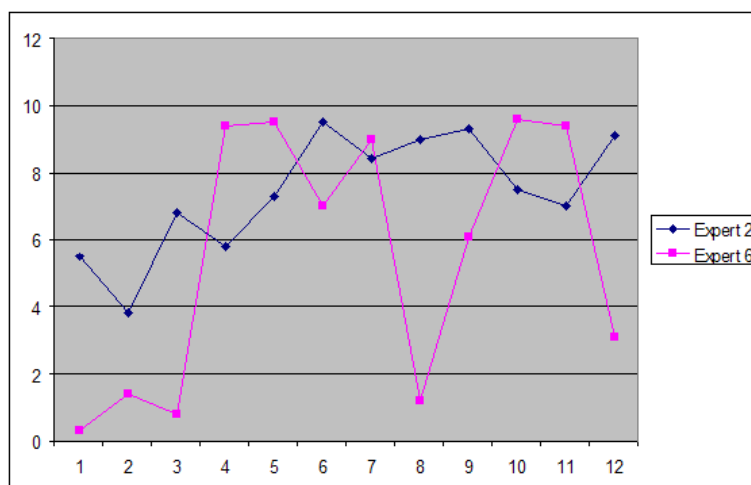


Figure 2.16: Comparaison des notations des experts 2 et 6. En abscisse, les 12 trompettes et en ordonnée, la note attribuée sur une échelle de 0 à 10.

du tableau 2.11, les experts 2, 5 et 10 n'ont pas distingué les produits, ou plutôt les ont trop peu différenciés vu ce qu'ils sont répétables. Ces experts sont à entraîner plus particulièrement sur l'attribut *justesse*. Au vu de ces résultats, étant donné le score très élevé de la statistique de Fisher pour l'effet produit, directement représentatif de l'aisance à différencier les produits, et malgré la faible interaction produit/sujet, le descripteur *justesse* est conservé pour la suite de l'étude.

Voyons maintenant les 3 descripteurs restants : *Mi*, *Aigu* et *Timbre*. A partir du tableau 2.14, on peut conclure à la différence entre produits car l'interaction produit/sujet n'est pas significative. On peut donc compléter cette analyse par le test de la PPDS entre produits deux à deux, expliqué dans la première analyse. On compare la valeur absolue de

la différence des moyennes à la valeur lue dans les tables de Student pour  $ks(r-1)$  degrés de liberté et au niveau  $\frac{2\alpha}{k(k-1)}$  multipliée par  $\sqrt{RSS(\frac{2}{rs})}$ .

On trouve alors que pour *Mi*, les branches AAAE et CHMQ sont perçues comme significativement différentes. Avouons que nous pensions trouver des différences plus marquées entre les instruments mais, ce résultat "moyen" sur un test qui nous semblait assez facile et que les trompettistes ont l'habitude de pratiquer, peut s'expliquer par l'orientation de l'échelle utilisée. En effet, pour le descripteur intitulé *Ecart de hauteur du Mi(0) et Mi(12)*, la borne gauche était "Important" et la borne droite "Très faible". Cette échelle a pu perturber les sujets, ce qui peut expliquer le fait qu'il n'y ait un effet produit que pour un expert. Le descripteur est conservé mais sa formulation et son échelle seront modifiées.

Pour *Aigu*, CHMQ est bien différencié de IFJN. Pour les autres branches, il faut certainement plus d'entraînement pour percevoir ces différences, si tant est qu'il y en ait. Malheureusement, le temps manque à un entraînement sur plusieurs séances et nous avons décidé de ne pas continuer avec ce descripteur, en s'appuyant sur le fait que la procédure semblait déjà mal adaptée à *Grave* et *Médium*, descripteurs complémentaires d'*Aigu* (un instrument se choisit pour sa palette sonore générale).

Pour *Timbre*, les branches sont perçues comme identiques. Pour le descripteur *Timbre*, la procédure de test s'est révélée non adaptée puisque les experts ont eu énormément de mal à noter le timbre dans l'absolu. Il a donc été décidé de conserver ce descripteur mais en modifiant la procédure de test qui devient donc une notation sur une échelle possédant une référence.

Pour conclure, cette séance d'entraînement, qui pour des raisons de temps sera l'unique préparation, nous a permis d'écarter les descripteurs non adaptés à notre épreuve. Elle nous a permis également de juger la répétabilité de nos sujets et leur aptitude à être ou non experts. Nous sommes conscients qu'il est illusoire de croire que des experts puissent être formés en une seule séance, mais notre objectif est d'abord d'aller au bout de la démarche de conception proposée et de l'illustrer, sans prétendre créer un nouveau produit commercialisable.

## 2.3.4 Analyse perceptive : la séance d'évaluation

### 2.3.4.1 Déroulement de la séance d'évaluation des trompettes

Après la séance de formation, nous avons donc proposé à nos experts une séance d'évaluation sur des instruments "préparés". A cette étape de la démarche de conception, nous considérons que les sujets sont formés et que les notations qu'ils vont produire sont fiables. Avec cette séance, nous souhaitons récolter le profil sensoriel des branches présentées.

### 2.3.4.1.1 Le choix des branches

Dans la séance de formation, les branches ont été choisies pour leur grande différence. Dans cette séance, nous tentons d'affiner les jugements des experts, en présentant volontairement des branches plus proches. Le critère de choix est la continuité du rayon de la branche, pour des raisons de réalisme, les branches du commerce possédant toutes cette qualité. Le rayon de sortie d'une portion de cylindre doit donc être égal au rayon d'entrée du suivant. Le diamètre de sortie de la pièce "embout" étant de 9.28 mm, seules les pièces A, B, C, D et E peuvent convenir comme premier cylindre (tableau 1.3). Il en est de même pour le dernier cylindre qui ne peut être que E, N, Q, R ou S. Ensuite, il faut chercher toutes les combinaisons qui respectent la contrainte de continuité. Les combinaisons retenues sont présentées dans le tableau 2.15.

AAAE	AAER	ABFN	ACHN	ACIQ	ADKN
AERR	BFLN	BFMQ	BFNR	BFOS	CGJQ
CHLN	CHMQ	CHNR	CHOS	CIPQ	CIQR
DKLN	DKMQ	DKNR	DKOS	ERRR	

Tableau 2.15: Ensemble des branches à perce continue, formées des pièces élémentaires générées

Ayant réduit notre liste de descripteurs de 8 à 3, *Justesse*, *Mi* et *Timbre*, nous avons décidé d'augmenter le nombre d'instruments testés à 12. Il nous faut donc éliminer encore 11 branches. Tout d'abord, les branches constituées de 3 cylindres et d'une seule partie conique ne ressemblent à aucune branche commercialisée donc nous éliminons AAAE, AERR, AAER et ERRR. Ensuite, nous regroupons les branches qui se ressemblent et n'en gardons qu'une par groupe, choisie au hasard, la sélection s'étant faite en essayant de garder un échantillon de chaque géométrie. ACHN est préférée à ACIQ, BFLN à BFMQ et BFNR. CHNR préférée à CHLN et CHOS, CIPQ à CIQR, DKNR à DKMQ et DKLN. Nous conservons CHMQ et DKOS, déjà présentes dans la séance d'entraînement pour tester la répétabilité inter-séance des experts. Les branches sélectionnées sont donc celles du tableau 2.16.

ABFN	ACHN	ADKN
BFLN	BFOS	CGJQ
CHMQ	CHNR	CIPQ
DKLN	DKNR	DKOS

Tableau 2.16: Les 12 branches sélectionnées

## L'épreuve

L'épreuve consistait donc à tester 12 branches répétées 2 fois pour des questions de durée d'épreuve donc 24 trompettes, chaque instrument étant à noter sur 3 descripteurs. Les trompettistes avaient pour consigne de ne noter l'instrument que sur la première minute de jeu. Le matériau musical était à l'initiative du musicien. Pour éviter le phénomène de lassitude, la séance était divisée en deux groupes A et B de 12 trompettes séparés par une pause, l'ordre de ces groupes changeant d'un trompettiste à l'autre. Précisons qu'aucune branche du groupe A n'apparaissait dans le groupe B et inversement.

Les trompettes étaient présentées dans l'ordre suivant :

Groupe A	Groupe B
ACHN	DKLN
CHNR	CHMQ
DKOS	ABFN
BFLN	ADKN
CGJQ	BFOS
DKOS	DKNR
CIPQ	ADKN
BFLN	DKNR
CGJQ	BFOS
CIPQ	DKLN
CHNR	CHMQ
ACHN	ABFN

Tableau 2.17: Ordre de présentation des branches en deux groupes : A et B

Les 3 descripteurs étaient (cf Annexe 1) :

- *Justesse générale à vide*, (sans piston enfoncé) sur une échelle allant de "Fausse" à "Juste",
- *Augmentation de hauteur du mi(0) au Mi(12)* sur une échelle de "Importante" à "Nulle",
- *Timbre général*, allant de "plus sombre, plus voilé" à "plus brillant, plus clair". Sur cette échelle, une référence (trompette Yamaha 1335) était placée au milieu. Il s'agissait alors plus d'une épreuve comparative car il est extrêmement difficile de juger la notion de timbre dans l'absolu. Les experts avaient donc à dire si la trompette était plus ou moins brillante par rapport à la référence.

Les tableaux des résultats bruts se trouvent en annexe 5. Seuls 9 experts ont participé à cette séance, pour des questions de disponibilité.



### 2.3.4.2 Résultats de la séance d'évaluation

#### 2.3.4.2.1 Contrôle de la répétabilité des experts

La même méthode que pour la séance d'entraînement est proposée, soit, une représentation des résultats sous forme de graphique croisé moyenne - écart-type.

Notons la performance des experts 1, 3, 8 et 9 qui semblent les plus répétables. Attention aux experts 2, 4 et 5 qui malgré l'utilisation de l'échelle complète ne sont pas réguliers dans leurs jugements.

#### 2.3.4.2.2 Homogénéité du panel

A cette étape, nous ne devrions pas vérifier l'homogénéité du panel, condition d'arrêt de l'entraînement. Mais, les experts n'ayant eu qu'une séance de formation, il est préférable de la tester quand même. De la même manière que pour la séance d'évaluation, une ACP non normée est réalisée sur les résultats des 3 descripteurs.

Ces trois figures montrent un bon accord entre les sujets, sur le descripteur *Justesse*. Les avis sont un peu moins homogènes sur le descripteur *Mi* et pour le dernier descripteur, *Timbre*, les individus 4 et 5 se distinguent nettement.

Le tableau 2.18 suivant donne le pourcentage d'inertie du premier axe de l'ACP normée sur les résultats des 3 descripteurs.

Descripteur	Justesse	Mi	Timbre
% inertie	31%	38%	34%

Tableau 2.18: Pourcentage d'inertie sur le premier axe de l'ACP normée sur les résultats de la séance d'évaluation

Ces résultats ne sont pas très consensuels. Ils ne montrent pas une bonne homogénéité entre les membres du panel d'experts. Cela est certainement dû au manque d'entraînement des sujets. Cependant, toujours avec notre objectif d'aller au bout de la démarche de conception, nous allons considérer ces résultats comme acceptables.

#### 2.3.4.2.3 Les analyses de la variance à 1 puis 2 facteurs

De la même façon que dans l'étude des résultats de la séance de formation, l'analyse de la variance à un facteur est effectuée pour savoir s'il y a un effet produit significatif de nos branches sur les descripteurs choisis. Les cases blanches signifient qu'il n'y a pas d'effet produit pour un seuil inférieur à 15%.

On remarque que pour le test du Mi, seuls 2 experts différencient les instruments au seuil de 5%, l'échelle ayant pourtant été changée par rapport à la séance précédente. Il y a deux explications à cela : soit la tâche demandée est trop difficile, soit la branche n'influence que très peu cette différence de hauteur entre les positions 0 et 12.

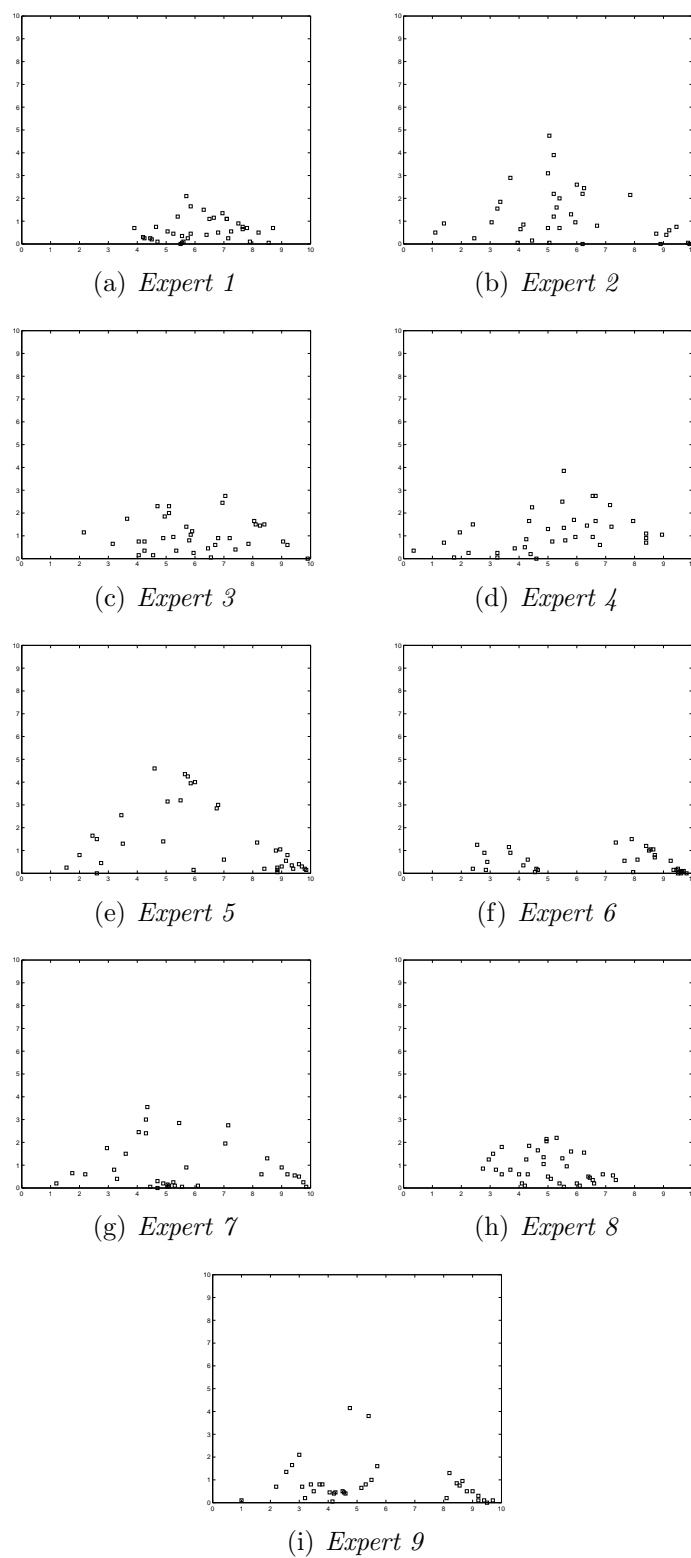


Figure 2.17: Représentation croisée moyenne / écart-type pour chaque expert pour la séance d'évaluation

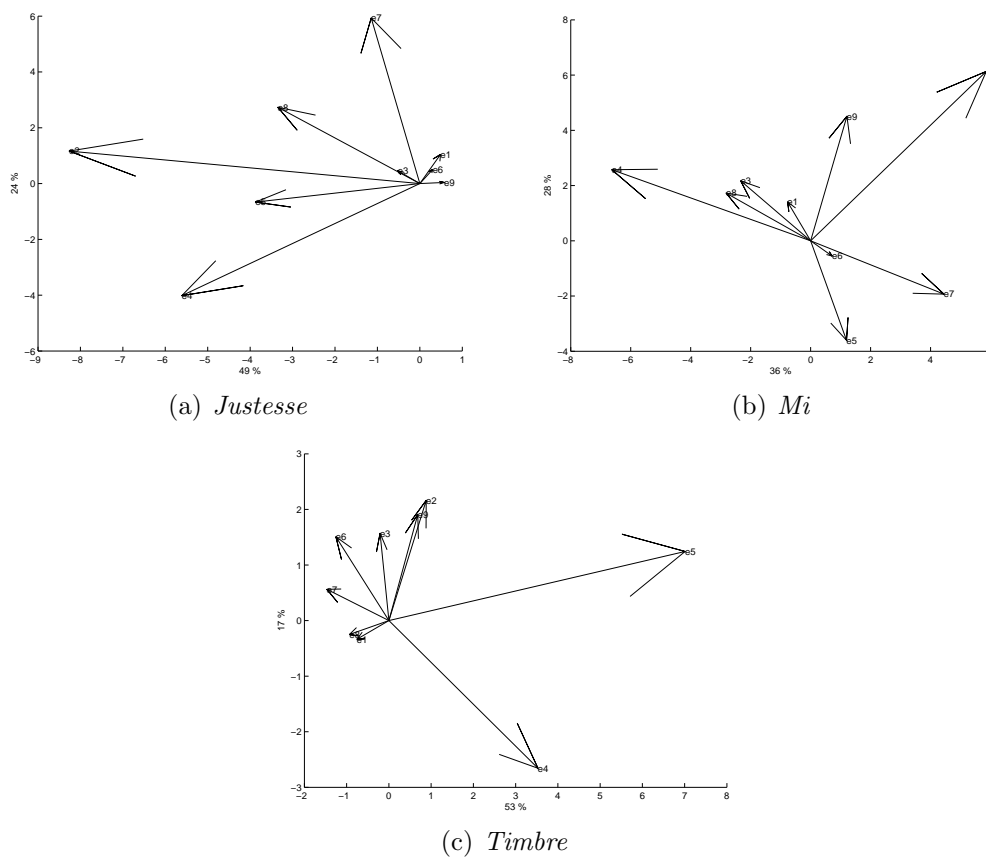


Figure 2.18: ACP produit / sujet par descripteur

Experts	Justesse	Mi	Timbre
Expert 1			0.57%
Expert 2	1.53%		8.99%
Expert 3		1.33%	
Expert 4	10.32%	0.26%	3.13%
Expert 5			4.49%
Expert 6	0.0%		8.54%
Expert 7	0.0%	10.3%	0.0%
Expert 8	1.45%		0.94%
Expert 9			

Tableau 2.19: Seuil de significativité de l'ANOVA 1 facteur pour la séance d'évaluation

Pour savoir si nos branches étaient effectivement différenciables sensoriellement sur cet attribut, nous avons relevé le 4<sup>e</sup> pic de la courbe d'impédance (doigté à vide) (harmonique 5 de Do, cf tableau 2.20) et le 6<sup>e</sup> pic de la courbe d'impédance position (12) de l'instrument (harmonique 6 de La). A chaque branche à été associé l'écart entre le Mi(0) et le Mi(12), noté  $\Delta$ . A partir de ces données, la différence entre ces écarts de hauteur est calculé (ex :  $\Delta_i - \Delta_{i+1}$ ), et exprimée en cents.

$$\Delta_{cents} = 1200 \cdot \frac{\ln((f + \Delta f)/f)}{\ln(2)} \quad (2.10)$$

Les résultats sont donnés dans le tableau 2.20.

Branches	$f_5(0)$ en Hz	$f_6(12)$ en Hz	Ecart en Hz	Ecart en cents
ABFN	574	583.5	9.5	28.42
ACHN	575.5	584.5	9	26.86
ADKN	576.5	585	8.5	25.34
BFLN	577.5	586	8.5	25.30
BFOS	575	583.5	8.5	25.40
CGJQ	577.5	585.5	8	23.82
CHMQ	579	587	8	23.76
CHNR	580.5	589	8.5	25.17
CIPQ	581	588	7	20.73
DKLN	582.5	590.5	8	23.61
DKNR	581.5	589.5	8	23.66
DKOS	581.5	589	7.5	22.19

Tableau 2.20: Comparaison des 2 positions pour le Mi

D'après le tableau 2.20, les différences de fréquence entre les deux pics de la courbe d'impédance sont du même ordre pour l'ensemble des branches, le maximum étant entre ABFN et CIPQ avec 7.69 cents d'écart. Nous prenons comme hypothèse que la fréquence de jeu est très proche de la fréquence de résonance. Sachant que l'oreille humaine peut distinguer deux sons distants de 5 cents, seules les différences entre les écarts de ABFN et CIPQ, et entre ACHN et CIPQ sont perceptibles. En tenant compte de nos hypothèses et de la difficulté de l'épreuve, il semble normal que les experts ne puissent pas relever cette différence puisque les différences de hauteur sont inférieures au seuil liminaire.

Pour la justesse et le timbre, l'effet produit pour un risque de 5% est présent pour respectivement 4 et 5 experts, ce qui est la moitié du panel. Nous devons pour préciser la validité de ces résultats, vérifier l'effet produit pour le groupe et l'interaction produit/sujet par l'analyse de la variance à deux facteurs.

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Moyenne quadratique
Produits	127.38	11	11.58
Sujets	516.43	9	64.55
Interaction	399.80	88	4.54
Résidu	392.22	108	3.63
Totale	1435.8	215	6.68

Tableau 2.21: Table d'analyse de la variance à 2 facteurs pour le descripteur *Justesse*

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Moyenne quadratique
Produits	60.34	11	5.49
Sujets	426.38	9	53.3
Interaction	582.1	88	6.61
Résidu	635.99	108	5.89
Totale	1704.8	215	7.93

Tableau 2.22: Table d'analyse de la variance à 2 facteurs pour le descripteur *Mi*

Source de variation	Somme des carrés	Degrés de liberté	Moyenne quadratique
Produits	44.63	11	4.06
Sujets	63.39	9	7.92
Interaction	211.76	88	2.4
Résidu	157.37	108	1.46
Totale	477.16	215	2.22

Tableau 2.23: Table d'analyse de la variance à 2 facteurs pour le descripteur *Timbre*

Si l'on relève dans les tables de Fisher-Snedecor les  $F_{theorique}$  pour l'effet produit, sujet et l'interaction, on trouve :

- $F_{th}(p) = F_{(5\%,11,108)} = 1.88$  ,
- $F_{th}(s) = F_{(5\%,8,108)} = 2.02$  ,
- $F_{th}(i) = F_{(5\%,88,108)} = 1.39$ .

Ci-dessous le tableau résumé des résultats de l'analyse de la variance à 2 facteurs :

	<i>Justesse</i>		<i>Mi</i>		<i>Timbre</i>	
	$F_{obs}$	p-value	$F_{obs}$	p-value	$F_{obs}$	p-value
Effet produit	3.19	0.09%	N.S.	-	2.78	0.3%
Effet sujet	17.78	<0.1%	9.05	<0.1%	5.44	<0.1%
Interaction Produit/Sujet	N.S.	-	N.S.	-	1.65	0.7%

Tableau 2.24: Valeur de la statistique de Fisher pour l'analyse de la variance à 2 facteurs pour la séance d'évaluation

Nous remarquons l'interaction produit/sujet sur le descripteur *Timbre*. Il serait donc inutile d'analyser plus finement ce résultat car il est le signe d'un manque d'entraînement des experts sur ce descripteur. Nous n'analyserons donc pas plus en détail ces résultats.

Pour le descripteur *Mi*, l'effet produit n'est pas significatif, ce qui signifie que les trompettistes n'ont en général pas différencié les instruments selon ce descripteur. Au regard des résultats de l'analyse à 1 facteur, ce problème est effectivement visible avec un effet produit au risque de 5% pour seulement 2 experts sur 9. Cela confirme donc la difficulté engendrée par cette épreuve sur le descripteur *Mi*. Les trompettes semblent identiques pour ce caractère.

Nous nous focalisons donc sur le descripteur *justesse*, qui, avec un effet produit et un effet sujet significatifs et une interaction non significative, nous permet d'approfondir notre analyse. Afin d'affiner la différenciation des produits, nous avons pratiqué le test de la PPDS entre les produits 2 à 2. Les résultats nous montrent qu'on ne peut rejeter l'hypothèse  $H_0$  pour aucune paire, donc qu'il n'y a pas de paires qui soit différenciable à chaque fois. Cela ne semble pas étonnant car les branches présentées à ce test étaient très proches, puisque toutes continues. Cependant, grâce à l'analyse de la variance à 2 facteurs, nous savons que le panel distingue les trompettes en général, sur l'attribut *justesse*, et ayant vérifié précédemment que le groupe d'experts est suffisamment homogène, on peut donner pour chaque trompette une note en justesse, qui sera la moyenne des notes attribuées par tous les experts pour une branche donnée, soit  $\underline{x}_{bj}$ ,  $j$  allant de 1 à 12. Les notes sont données en tableau 2.25.

Branch	Score de Justesse
ACHN	8.24
CHNR	7.19
DKOS	6.45
BFLN	8.25
CGJQ	7.72
CIPQ	6.93
DKLN	6.96
CHMQ	6.95
ABFN	7.02
ADKN	8.97
BFOS	8.09
DKNR	6.44

Tableau 2.25: Scores de justesse des 12 branches issus de la séance d'évaluation

### 2.3.5 Analyse objective : les mesures d'impédance

Dans notre étude, la caractéristique majeure d'un instrument de musique est son impédance d'entrée, dont on peut extraire des critères objectifs.

Comme dit dans la première partie de ce document, le corps de l'instrument de musique constitue un résonateur acoustique, qui peut être caractérisé, si on le suppose linéaire, par son impédance d'entrée  $Z_e$ , c'est à dire sa fonction de transfert entre le débit entrant et la pression à l'entrée.

$$Z_e(j\omega) = \frac{Pe(j\omega)}{Ue(j\omega)} \quad (2.11)$$

L'impédance acoustique est caractéristique de chaque instrument, plus particulièrement de chaque géométrie d'instrument. C'est la signature de la trompette. Elle donne l'amplitude de sa réponse acoustique à une excitation donnée (réponse en oscillations forcées). Il apparaît plusieurs fréquences privilégiées qui sont les partiels du résonateur, pour lesquels on a un maximum (pic) d'impédance. L'impédance d'entrée des 12 trompettes proposées lors des tests subjectifs a été mesurée à l'aide du dispositif BIAS [WID], en utilisant la même embouchure (Yamaha 15B4). Les pics d'impédance sont ensuite relevés par une étude du signe de la dérivée de la courbe d'impédance.

Nous cherchons à expliquer la *Justesse* par des données objectives. Pour cela, nous voulons corréliser aux données subjectives non pas les fréquences directement mais plutôt des rapports de fréquences, basés sur les harmoniques. Les harmoniques sont par définition, dans un son périodique, les composantes sinusoïdales dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale. Par exemple, avec Do 1 (figure 2.19) :

Le premier Do est une note pédale, non utilisée dans le registre de la trompette. C'est

Branches	$f_{max}(2)$	$f_{max}(3)$	$f_{max}(4)$	$f_{max}(5)$	$f_{max}(6)$	$f_{max}(7)$	$f_{max}(8)$
ABFN	230.5	343.5	454.5	574	691	801.5	901.5
ACHN	230	344.5	457	575.5	690	801	904.5
ADKN	229.5	345.5	460	576.5	687.5	796.5	906
BFLN	229.5	346	460.5	577.5	687.5	796.5	907
BFOS	229	347	463	575	685	799.5	908.5
CGJQ	229.5	345.5	460	577.5	690	799	903
CHMQ	228.5	346	463	579	687.5	796	905
CHNR	229	347.5	465	580.5	689	798.5	908
CIPQ	228.5	346.5	464.5	581	687	796	907
DKLN	227.5	344.5	463.5	582.5	690	791.5	901.5
DKNR	227.5	345.5	465	581.5	688.5	794	902
DKOS	228	346.5	465.5	581.5	688.5	795.5	903.5

Tableau 2.26: Relevé des pics d'impédance sur les mesures des 12 trompettes

Harmoniques	1	2	3	4	5	6	7	8
Fréquence	32.7	65.4	98.1	130.8	163.5	196.2	228.9	261.6
Note	Do	Do	Sol	Do	Mi	Sol	<i>Sib</i>	Do

Tableau 2.27: Les harmoniques de la note Do



Figure 2.19: Harmoniques du Do1



pourquoi nous n'en parlerons pas. Les intervalles les plus importants sont ici l'octave, la quinte et la tierce. Nous choisissons donc les rapports de fréquences correspondants :

- $f_{max}(4)/f_{max}(2)$  et  $f_{max}(8)/f_{max}(4)$  pour l'octave,
- $f_{max}(3)/f_{max}(2)$  et  $f_{max}(6)/f_{max}(4)$  pour la quinte,
- $f_{max}(5)/f_{max}(4)$  pour la tierce.

L'étape suivante consiste à corrélérer les données objectives collectées (courbes d'impédance) aux données perceptives issues des tests (scores de justesse).

### 2.3.6 Corrélations données objectives / données perceptives

En données objectives, nous avons les rapports des fréquences de résonance pour chaque instrument, soit 5 données par branche. Les données perceptives sont les notes de justesse données par les experts, soit une donnée pour chaque branche. Nous cherchons donc à expliquer une variable (la justesse) à l'aide d'un ensemble de variables explicatives (les rapports de fréquence). C'est la définition même de la régression multiple. Cependant, nous ne pouvons employer cette technique visant à trouver les coefficients d'un modèle prédictif car elle nécessite l'inversion de la matrice de données explicatives, qui, dans le cas de variables corrélées est difficile. Or, les rapports de fréquences sont évidemment très corrélés entre eux. L'analyse qui a semblé alors la plus adaptée est la régression sur les composantes principales.

#### 2.3.6.1 L'analyse en composantes principales

Lorsque l'on a un nuage de points dans un espace multidimensionnel, l'analyse en composantes principales va rechercher un nouveau système d'axes qui va décrire au mieux les dimensions réelles du nuage. On peut ainsi simplifier des données multidimensionnelles en bi voire monodimensionnelles. Pour choisir la dimension de l'espace, un compromis doit être fait entre la plus petite taille d'espace possible et la plus grande quantité d'informations présentée (pourcentage explicatif important).

Dans notre cas, nous partons d'une matrice de 12 individus (branches) pour 5 variables (rapports de fréquences). Une ACP normée (donc, qui donne la même influence aux 5 variables) sur ce tableau de données conduit au plan factoriel suivant (figure 2.20).

Nous pouvons remarquer des branches de comportement proches comme DKOS et DKNR ou bien ADKN et BFLN. Les branches ABFN et BFOS semblent particulières puisqu'elles se trouvent éloignées des autres sur le plan. Concernant les variables, nous voyons deux tendances : les rapports d'octave et les rapports de tierce et quinte.

Ensuite, nous avons construit un modèle permettant d'interpréter le score de justesse  $J$  (Tableau 2.25) en fonction de la position dans le plan factoriel. Un modèle linéaire (vectoriel) n'étant certainement pas adapté pour décrire la réalité (une justesse avec des

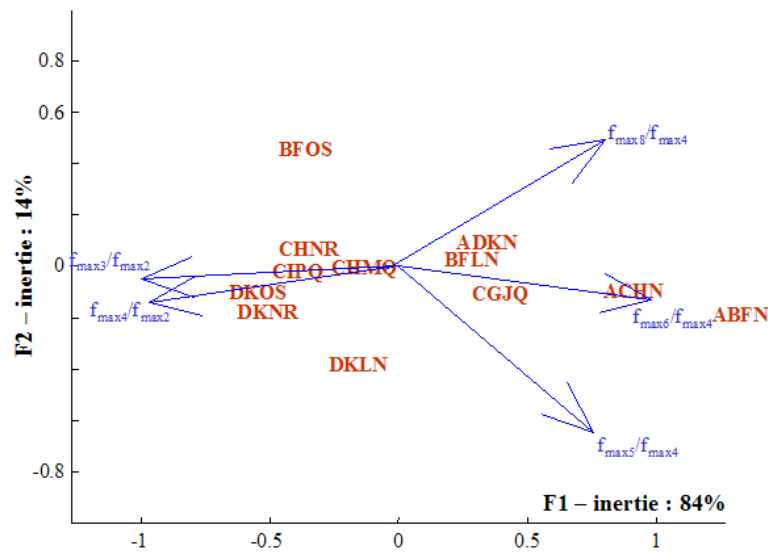


Figure 2.20: Plan factoriel

valeurs "infinies" n'a aucun sens), nous avons proposé un modèle quadratique du type :

$$J_i = a.F1_i + bF2_i + c.(F1_i^2 + F2_i^2) + d \quad (2.12)$$

Les estimateurs de a, b, c des coefficients de la régression, obtenus par la méthode des moindres carrés (régression linéaire multiple), sont donnés dans le tableau 2.28.

a	b	c	$R^2$	$F_{obs}$
2.03	2.6	-2.02	0.70	6.14

Tableau 2.28: Coefficients de la régression linéaire multiple

Le coefficient de détermination  $R^2$  de la régression vaut 0,7. L'ajustement des données sur le modèle est donc très correct. De plus, la régression est significative au seuil de 5% (test de Fisher  $F_{obs} > F_{5\%,(k;N-k-1)} = F_{5\%,(3;8)} = 4,07$  - le risque qu'il n'y ait pas de lien linéaire entre les variables est inférieur à 5%).

Ensuite, le modèle quadratique proposé étant un modèle à point idéal, on peut tracer sur le plan principal (figure 2.20 le point idéal "Cible", correspondant au point extremum du paraboloïde de révolution donné par l'équation 2.12 (point de coordonnées  $(-a/2c ; -b/2c)$ , i.e. (0,5 ; 0,6)). Il s'agit ici d'un idéal positif (maximum de justesse), qui indique que, selon nos données, l'optimum de justesse selon les experts se trouverait à la position du point "Cible".

L'hypothèse selon laquelle les rapports des fréquences de résonance sont des variables pertinentes pour expliquer l'évaluation subjective de la justesse semble confirmée, ( $R^2 = 0,7$  - régression significative), ainsi que l'hypothèse selon laquelle l'évaluation globale de la justesse par les experts est fonction de la justesse des 5 principaux intervalles présents

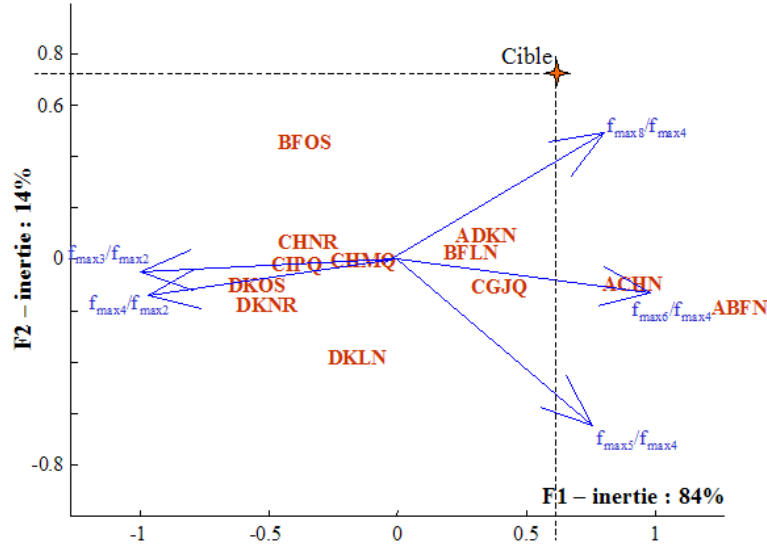


Figure 2.21: Plan factoriel avec cible

dans la tessiture de l'instrument.

### 2.3.6.2 L'analyse en composantes principales inverse

L'objectif est d'obtenir des valeurs de variables initiales qui correspondent à la position de la cible. Dans notre cas, nous avons comme données de départ les 2 coordonnées de notre *cible* dans le plan principal. Il n'y a pas d'unicité à l'ACP inverse. Une hypothèse sensée est d'attribuer une valeur nulle sur les 3 derniers axes, pour former le vecteur N. Le but est d'obtenir les valeurs des 5 rapports de fréquences correspondant à cet instrument. Il faut donc inverser l'ACP.

La méthode d'analyse en composantes principales employée opère sur des données tout d'abord centrées (en soustrayant à chaque note la moyenne  $\bar{x}$ ), puis réduites (en divisant par l'écart-type ET multiplié par la racine du nombre d'individus  $n$ ). Le calcul de la matrice des corrélations permet de trouver les valeurs propres et les vecteurs propres associés. La matrice des vecteurs propres est classée dans l'ordre décroissant des valeurs propres, les valeurs propres représentant la contribution du vecteur propre au plan factoriel. Le premier vecteur contiendra donc le maximum d'informations, puis le second un peu moins, etc. Cette matrice est notée  $u_1$ . Les coordonnées dans le plan factoriel sont calculées en multipliant la matrice des données centrées réduites par  $u_1$  (Equation 2.13).

$$\begin{aligned}
 M_c &= M - \bar{x} \\
 M_{cr} &= M_c / (ET \cdot \sqrt{n}) \\
 M_{plan} &= M_{cr} * u_1
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

L'analyse en composantes principales inverse se décompose donc en trois étapes (Equa-

tion 2.14).

$$\begin{aligned} N_{cr} &= N_{plan} * u_1^{-1} \\ N_c &= N_{cr} * (ET \cdot \sqrt{n}) \\ N &= N_c + \bar{x} \end{aligned} \tag{2.14}$$

Le résultat est donné dans le tableau 2.29. Si les rapports semblent très proches de rapports harmoniques, ce petit écart apparent est en fait significatif. Les différences entre les rapports  $f_{max}(4)/f_{max}(2)$  et  $f_{max}(8)/f_{max}(4)$  sont perceptibles car l'oreille humaine peut percevoir une différence de l'ordre de 5 cents. Or,  $1/2$  ton vaut  $2^{1/12}$  cents, donc 5 cents est équivalent à  $2^{5/1200} = 1.003$ . Les variations non perceptibles autour de ces rapports sont donc de l'ordre de  $3.10^{-3}$ .

Il faut maintenant chercher la géométrie de l'instrument à laquelle correspondraient ces rapports. Nous proposons de résoudre ce problème par optimisation.

$f_{max}(4)/f_{max}(2)$	$f_{max}(8)/f_{max}(4)$	$f_{max}(3)/f_{max}(2)$	$f_{max}(6)/f_{max}(4)$	$f_{max}(5)/f_{max}(4)$
2.038	1.994	1.509	1.546	1.314

Tableau 2.29: Valeur des rapports de fréquence pour la cible de l'optimisation

## 2.3.7 Optimisation

Nous avons présenté, dans le chapitre 1, le modèle de calcul de l'impédance et dans le chapitre précédent, déterminé une cible pour l'optimisation. Nous allons donc tenter de trouver une solution qui se rapproche le plus de cette cible.

### 2.3.7.1 Problème d'optimisation

Notre problème de conception est de trouver les variables de conception de l'instrument correspondantes aux valeurs des rapports de fréquence de notre cible. Nous avons transcrit ce problème de conception en un problème d'optimisation multi-objectifs.

$$\begin{array}{l}
\text{minimiser} \\
x = [r_2 \ r_3 \ r_4]
\end{array}
\left|
\begin{array}{l}
e_1 = \left| \frac{f_{max3}}{f_{max2}} - \frac{f_{c3}}{f_{c2}} \right| \\
e_2 = \left| \frac{f_{max6}}{f_{max4}} - \frac{f_{c6}}{f_{c4}} \right| \\
e_3 = \left| \frac{f_{max4}}{f_{max2}} - \frac{f_{c4}}{f_{c2}} \right| \\
e_4 = \left| \frac{f_{max8}}{f_{max4}} - \frac{f_{c8}}{f_{c4}} \right| \\
e_5 = \left| \frac{f_{max5}}{f_{max4}} - \frac{f_{c5}}{f_{c4}} \right|
\end{array}
\right.
\quad (2.15)$$

avec  $f_c$  les fréquences correspondant à la cible.

Les fonctions objectif (Eq. 2.15) sont les écarts entre les valeurs de la cible (Tableau 2.29) et les rapports de fréquences extraites des calculs de l'impédance d'entrée. Ces fréquences  $f_{max}$  sont calculées en utilisant la méthode des lignes de transmission décrite au chapitre 1.

Les variables d'optimisation sont les rayons  $r_2$ ,  $r_3$  et  $r_4$  de la branche d'embouchure. Le problème d'optimisation est donc de déterminer les valeurs de  $x = [r_2 \ r_3 \ r_4]$  qui minimisent les 5 fonctions objectif.

Parmi les différentes méthodes d'optimisation qui existent, notre stratégie d'optimisation s'est portée sur les algorithmes génétiques.

### 2.3.7.2 Pourquoi les algorithmes génétiques ?

Il était pour nous impossible d'envisager une méthode de recherche systématique, c'est-à-dire, calculer et tester chaque solution. En effet, chaque rayon de branche peut prendre plus de 150 valeurs et 3 rayons sont à combiner. Cela fait, pour une durée moyenne de 1 seconde par branche, plus de 50 jours de calcul ininterrompu. Des méthodes basées sur l'heuristique (aide à la recherche de solutions par évaluations successives et hypothèses provisoires) ont alors été développées pour les problèmes de complexité trop importante. C'est le cas du gradient, du recuit-simulé et des algorithmes génétiques par exemple. L'inconvénient du recuit-simulé et de la méthode du gradient est que le résultat dépend énormément de la population que l'on fournit à l'origine puisque l'on recherche les solutions au voisinage des points de départ. Cela ne permet d'explorer que très peu l'espace de travail et surtout, ne permet pas de surmonter le problème des minima locaux, ce qui les rend moins robustes.

N'ayant pas d'idée a priori de la solution, notre choix s'est porté sur les algorithmes génétiques qui sont quant à eux, des algorithmes d'optimisation stochastiques (basés sur le hasard) dont le but est d'obtenir une solution convenable dans un temps acceptable. Ils

sont utilisés dans beaucoup de domaines de recherche en ingénierie ou en économie par exemple. Nous avons choisi de travailler en multi-objectif pour avoir non pas une seule solution mais une famille de bonnes solutions qui seront situées sur la "frontière de Pareto" qui est l'ensemble des solutions qui ne se dominent pas entre elles.

Les algorithmes génétiques, inspirés de la génétique classique, ont été mis au point par John Holland et son équipe pour tenter d'expliquer rigoureusement le processus adaptatif des systèmes naturels et pour créer des systèmes artificiels basés sur ces mécanismes. Ils reposent sur la théorie Darwinienne de l'évolution, basée sur deux postulats simples :

- "Dans chaque environnement, seules les espèces les mieux adaptées perdurent au cours des temps, les autres étant condamnées à disparaître",
- "Au sein de chaque espèce, le renouvellement des populations est essentiellement dû aux meilleurs individus de l'espèce".

Les algorithmes génétiques conservent ces deux principes, en utilisant un critère de survie des éléments les mieux adaptés à l'environnement et en faisant se propager le patrimoine génétique avec une sélection des individus.

### 2.3.7.3 Définitions et codage des branches

L'un des avantages des algorithmes génétiques est que l'on travaille sur une **population** de solutions et non une solution unique. Une population est composée de  $N$  **individus** ou **chromosomes**. Chaque individu est composé de **gènes** qui ont une position (**locus**) et une valeur appelée **allèle** (Figure 2.22. Dans le codage binaire, un gène vaut soit 0 soit 1 [COL 02]).

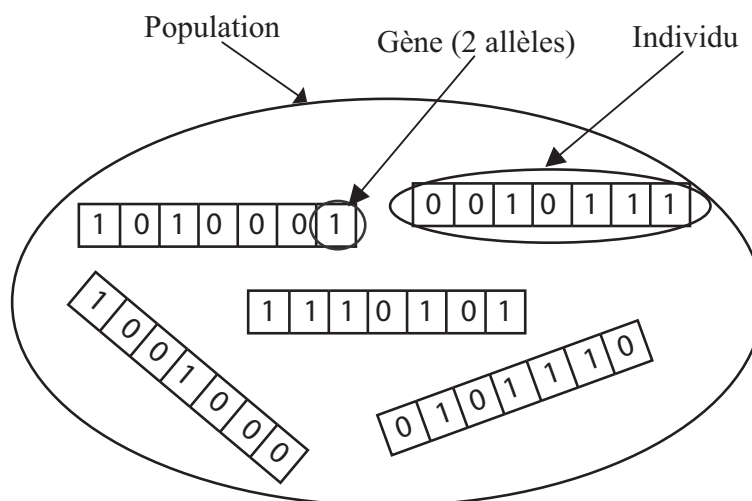


Figure 2.22: Vocabulaire Algorithme génétique

Dans notre étude, l'individu est la branche (représentant la trompette complète), qui se décompose en 3 variables  $x_1$ ,  $x_2$  et  $x_3$  (gènes) qui sont les 3 rayons variables des portions

de cylindre. Chaque rayon est compris entre 0.002 et 0.01m par pas de  $5 \cdot 10^{-5}$ , ce qui fait 160 allèles possibles. Chaque gène sera donc codé en binaire sur 8 bits, ce qui étend le codage d'un individu à 24 bits.

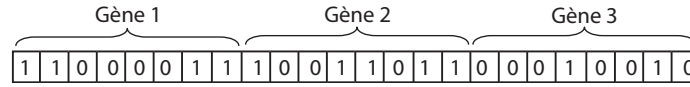


Figure 2.23: Représentation d'un individu

Pour coder et décoder ces individus, on utilise le facteur d'échelle suivant :

$$Echelle = \frac{x_{max} - x_{min}}{2^n - 1} \quad (2.16)$$

avec n le nombre de bit nécessaire à coder x (ici 8). Dans notre cas, le facteur d'échelle est égal à  $3.14 \cdot 10^{-5}$ . Si l'on reprend l'exemple de la figure précédente, on a :

- $(11000011)_2 = 195_{10}$  donc, 0.0082m,
- $(10011011)_2 = 155_{10}$  donc, 0.0069m,
- $(00010010)_2 = 18_{10}$  donc, 0.0026m.

Cette branche a donc pour rayons en mm :  $[r1 \ r2 \ r3] = [8.2 \ 6.9 \ 2.6]$ .

#### 2.3.7.4 Les opérations sur les individus

Un algorithme génétique possède 3 opérations sur les individus :

- la reproduction : le chromosome est simplement recopié dans la génération suivante,
- le croisement : cette opération s'effectue en deux temps. On sélectionne d'abord deux éléments dans la population actuelle et une position de croisement puis, on échange la fin de ces chromosomes à partir de la position de croisement,
- la mutation : change la valeur d'un gène en la mutant à la position indiquée.

Ces trois opérations sont très simples mais c'est ce qui donne toute leur puissance aux algorithmes génétiques. La reproduction permet de garder les individus "forts" (nous en verrons la définition dans le paragraphe suivant) d'une génération à l'autre. Le croisement permet de développer les individus en les combinant et d'explorer rapidement un grand espace de travail. Les mutations évitent de rester bloqué dans un optimum local. Pour gérer la fréquence de ces opérations, on introduit un **taux de mutation** et un **taux de croisement**, le deuxième étant généralement supérieur au premier. Un taux de 75% exprime qu'on a à chaque fois 3 chances sur 4 d'avoir un croisement par exemple. Dans notre étude, on a  $T_{croisement} = 80\%$  et  $T_{mutation} = 15\%$ .

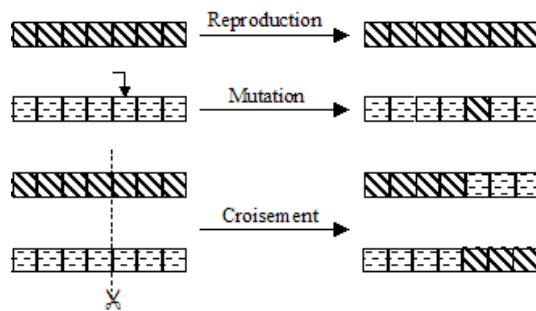


Figure 2.24: Opérations sur les individus

### 2.3.7.5 Adaptation et fonction objectif

Pour chaque individu, on va estimer son "efficacité" par rapport à l'environnement dans lequel il vit. Comme dans la théorie de Darwin, les éléments les mieux adaptés survivent. Donc, plus leur adaptation sera grande, plus la chance sera grande de retrouver les individus dans la population suivante.

A partir de la géométrie interne de l'instrument, nous pouvons calculer son impédance d'entrée. De cette courbe sont issus les 8 premiers pics et calculés les rapports  $f_{\max}(4)/f_{\max}(2)$ ,  $f_{\max}(8)/f_{\max}(4)$ ,  $f_{\max}(3)/f_{\max}(2)$ ,  $f_{\max}(6)/f_{\max}(4)$  et  $f_{\max}(5)/f_{\max}(4)$ . Ensuite, la distance à la "cible" calculée en section 2.3 est déterminée. Cela nous fait 5 erreurs que nous tentons de minimiser.

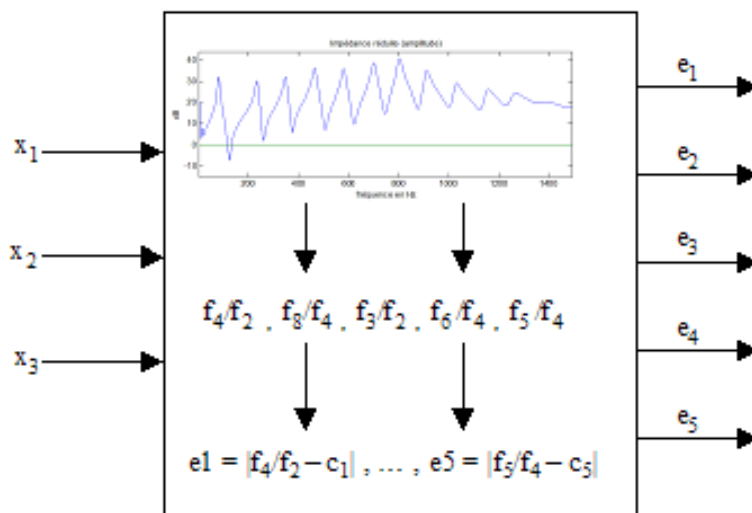


Figure 2.25: Description de la fonction multi-objectifs

Notre algorithme est basé sur une méthode "agrégative" [COL 02] et plus particulièrement sur la méthode MOGA (*Multiple Objective Genetic Algorithm*), qui s'appuie sur la dominance au sens de Pareto. Le "**rang**" d'un individu est le nombre d'individus plus performant que lui. Sur nos 5 objectifs, pour être meilleur que les autres, il faut être au moins aussi bon sur tous les objectifs et meilleur sur au moins un des objectifs. Un individu qui n'est pas dominé sera alors de rang 1. Dans notre application, cela nous semblait



surcontraindre le problème car il est très rare de pouvoir répondre à ces critères et tous nos éléments restaient donc de rang 1, rendant la comparaison difficile. Nous avons donc limité à 4/5 le nombre d'objectifs sur lesquels l'individu doit être au moins aussi bon. L'adaptabilité d'un individu sera la somme de tous les rangs moins celui de l'individu. Un individu dominé par un nombre important aura un rang élevé, donc, une adaptabilité plus faible et donc beaucoup moins de chances de se retrouver dans la génération suivante.

### 2.3.7.6 Déroulement de l'algorithme

L'algorithme se divise en 5 étapes (figure 2.26) :

- Création d'une population initiale,
- évaluation de cette population,
- classement de la population,
- génération d'une nouvelle population,
- test du critère de convergence.

La première étape consiste à générer  $N$  individus.  $N$  est choisi comme compromis entre un nombre significatif d'individus pour un temps de calcul raisonnable. Nous avons choisi 60 individus, c'est-à-dire 20 fois notre nombre de variables. Nous avons introduit dans notre population de départ les 12 individus qui étaient présentés dans notre phase d'évaluation. Nous y avons ajouté 48 autres branches, désignées au hasard : pour chaque bit du chromosome, on choisit entre 0 et 1. Puis, une fois les 24 choix faits, on traduit cet élément en 3 rayons de branche.

L'évaluation de la population consiste au calcul des valeurs de la fonction objectif pour chacune des branches. Cela renvoie un tableau de 5 valeurs par branche.

Le classement de la population revient à attribuer un rang à chaque élément, comme expliqué dans la partie précédente.

La partie la plus importante est la génération de la nouvelle population. Elle sera répétée tant que le critère de convergence ne sera pas atteint.

Deux parents sont sélectionnés au hasard dans la population actuelle, puis, ils subissent un croisement et/ou une mutation, ou bien une reproduction. Cela crée deux enfants. Leur objectif est calculé puis leur rang dans la population actuelle, puis on compare ces rangs à ceux de leurs parents dans cette même population. Ne sont conservés que les 2 meilleurs sur les 4 enfants/parents (en cas d'égalité, on donne la préférence à l'enfant) qui sont injectés dans la population en éliminant les 2 moins bons. Pour permettre à la population de se renouveler totalement, cette étape est réitérée  $N/2$  fois. On remarque ici qu'un enfant juste créé peut être sélectionné à son tour pour être parent dans la même génération. C'est ce qu'on appelle un algorithme génétique progressif.

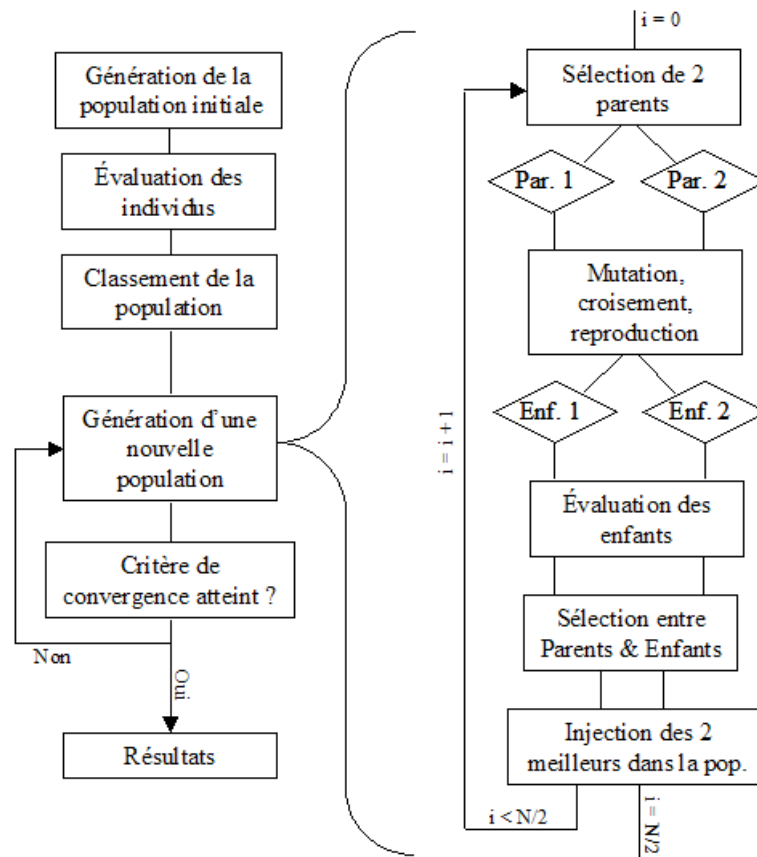


Figure 2.26: Déroulement de l'algorithme génétique

Une fois la génération terminée, le critère d'arrêt est testé. Ce test est en 4 étapes :

- contrôle du nombre de générations par rapport au nombre maximum donné. Ce critère est indispensable puisqu'il est le seul arrêt certain de l'algorithme ;
- si tous les éléments sont de rang 1, la reproduction est également stoppée. Cela signifie que l'on atteint une frontière de Pareto ;
- contrôle des dissemblances entre les populations  $n-1$  et  $n$ . Si elles sont identiques, cela signifie que l'évolution est stoppée et que l'on est tombé dans un extremum local ;
- vérification du seuil fixé, en-dessous duquel nous estimons que les deux valeurs sont semblables. Pour fixer ce seuil, nous sommes partis du fait que l'oreille humaine ne peut percevoir une différence inférieure à 5 cents. Or,  $1/2$  ton vaut  $2^{1/12}$  cents, donc 5 cents est équivalent à  $2^{5/1200} = 1.003$ , ce qui fait un écart autorisé de 0.15% en valeur absolue.

Voilà ci-dessous le tableau redonnant les valeurs de la cible avec le seuil associé.

Tant que le critère de convergence n'est pas atteint, donc, que la population ne satisfait aucune de ces quatre conditions, une nouvelle population est générée. Dans le cas contraire, nous ne conservons dans la population finale que les solutions de rang 1.

	$f(4)/f(2)$	$f(8)/f(4)$	$f(3)/f(2)$	$f(6)/f(4)$	$f(5)/f(4)$
Valeur	2.0378	1.9941	1.5091	1.5459	1.3136
Seuil	$3.10^{-3}$	$3.10^{-3}$	$2.3.10^{-3}$	$2.3.10^{-3}$	$1.9.10^{-3}$

Tableau 2.30: Seuil du critère de convergence pour chaque objectif

### 2.3.7.7 Les solutions

Après 2000 générations, donc le critère d'arrêt du nombre maximum de générations, on obtient une trentaine de solutions de rang 1. Il serait possible de continuer jusqu'à 10000 générations pour avoir la population entière de rang 1 mais le temps de calcul et donc l'intérêt des algorithmes génétiques seraient remis en cause.

Afin de déterminer quelle est, parmi les 31 solutions, la meilleure, une simple somme des objectifs ne serait pas adaptée. Un instrument A qui atteint la cible sur 4 des objectifs et est très éloigné sur le 5<sup>e</sup> et un instrument B qui serait un peu distant de la cible mais de manière équivalente sur les 5 objectifs, seraient mis au même niveau. Or, cela ne nous semble pas comparable. Nous ne savons pas si l'octave joue un rôle primordial sur la tierce ou la quinte; nous n'avons pas de poids à attribuer aux objectifs. Si c'était le cas, notre optimisation aurait été en mono-objectif en comparant la somme des objectifs pondérés.

A partir des résultats précédents, donc des valeurs des 5 objectifs pour chaque solution, et à partir de l'ACP faite dans le paragraphe 2.5, les instruments virtuels sont projetés dans le plan factoriel et y calculer la distance à la cible (Figure 2.27). Ainsi, on pourra sélectionner les meilleures solutions. Nous projetons les instruments virtuels en individus supplémentaires dans le plan factoriel de l'ACP dont nous avons issu les coordonnées de la cible. Les coordonnées des solutions dans le plan sont alors déterminées.

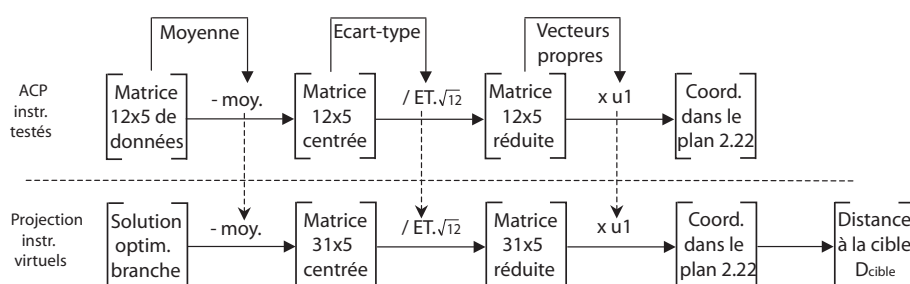


Figure 2.27: Projection des instruments dans le plan

Une fois nos données centrées réduites (données auxquelles est soustraite la moyenne puis le résultat divisé par l'écart-type que multiplie  $\sqrt{12}$ ), elles sont multipliées par la matrice des vecteurs propres issue de l'ACP. Seules les 2 premières colonnes qui sont les 2 coordonnées de nos solutions dans le plan factoriel où se situe la cible sont conservées. La distance à la cible pour chacune des 31 solutions est ensuite calculée et les 10 meilleures sont sélectionnées (Tableau 2.31).

N°	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$D_{cible}$
1	4.3	5.4	6	0.068
2	4.6	5.3	5.9	0.27
3	4.6	5.3	6	0.28
4	4.6	5.4	5.7	0.39
5	4.6	5.5	5.8	0.40
6	4.6	5.5	5.9	0.43
7	4.7	5.4	6	0.43
8	4.9	5.3	5.9	0.46
9	4.3	5.5	6	0.46
10	4.7	5.5	5.9	0.50

Tableau 2.31: Résultat de l'optimisation : rayon des branches en mm

Notons que ces branches sont proches et ont toutes la même forme de géométrie. Elles se rapprochent de celle de la branche BFOS, qui est d'ailleurs la plus proche de la cible sur le plan factoriel. La prochaine étape serait donc de fabriquer cette branche et de l'intégrer dans une séance de tests pour valider notre démarche.

### 2.3.8 Validation de la branche idéale

Le principe est de fabriquer une ou plusieurs branches du tableau 2.31 et de les inclure dans une nouvelle séance d'évaluation. Pour contrôler les jugements des experts, nous envisageons de garder des branches communes à la séance d'évaluation. Pour confronter les branches optimisées aux précédentes, nous décidons de les comparer notamment à la branche BFOS, qui a obtenu la meilleure note en justesse à la séance d'évaluation. De plus, nous optons pour les branches CHMQ qui avait été choisie pour la séance d'entraînement et pour la branche DKLN, assez éloignée du point cible dans le plan factoriel. Un total de 5 branches (dont 1 ou 2 optimisées + BFOS + CHMQ + DKLN par exemple), répétées 3 fois serait présenté. Le seul descripteur à évaluer serait la justesse puisque les branches ont été optimisées sur ce critère.

Pour des raisons de temps, cette étape n'a pu, au moment de l'impression de ce rapport, être réalisée. Elle sera mise en place dans le courant de l'année.

## 2.4 Conclusions

L'utilisateur est le seul à savoir vraiment ce qu'il souhaite. Un entretien avec lui ne suffit pas à définir complètement ses attentes. Il faut instaurer des échanges. Dans notre méthode, nous proposons une interaction concepteur / utilisateur en aidant ce dernier à exprimer ses souhaits.

Nous avons montré dans cette étude qu'il est possible de trouver une relation entre des données perceptives et des données objectives en utilisant les techniques de profil sensoriel et les outils d'analyse de données. La première étape est la détermination des descripteurs : nous avons choisi de faire intervenir les musiciens pour générer une liste de termes qui, après une séance de travail en groupe, a évolué vers une liste de 6 descripteurs. La séance d'entraînement, dont la consigne était de tracer le profil sensoriel des instruments présentés, a permis aux trompettistes d'aborder ce type d'épreuves et de se familiariser avec l'environnement des tests. Elle a également permis de développer son acuité à noter les instruments sur des échelles de façon répétable. Le but de cette séance était d'une part de faire acquérir aux sujets les capacités attendues d'un expert et d'autre part de sélectionner les descripteurs les plus adaptés à l'étude.

Une fois cet entraînement réalisé, les experts ont participé à une séance de notation sur les descripteurs retenus. Ces évaluations ont servi de base à un programme d'optimisation (algorithme génétique) qui a fourni les coordonnées géométriques d'une branche correspondant à un maximum de justesse, descripteur sélectionné. L'utilisateur intervient également dans la phase de test du prototype du produit optimisé. C'est la prochaine étape de notre étude : contrôler le résultat de l'optimisation par un test perceptif pour valider notre méthodologie.

Il n'existe pas ou très peu de profil sensoriel sur les instruments de musique. C'est ce qui vaut le caractère nouveau de notre étude. Concernant l'utilisation de technique du profil sensoriel pour les instruments de musique, le bilan est positif. Pour certains descripteurs comme la justesse par exemple, les experts ont noté les instruments suivant la même tendance, et ont été homogènes. Les techniques semblent donc bien adaptées au domaine des instruments de musique. Il faut cependant noter que le choix des descripteurs reste une étape très délicate, puisque pour des descripteurs comme la réponse ou le centrage, la difficulté s'est accrue. Le problème de ces deux descripteurs est qu'ils sont employés tous deux pour exprimer une notion proche. Il arrive même que certains musiciens emploient le même mot pour exprimer une idée différente, ou, inversement, qu'ils veuillent exprimer la même idée mais l'un utilisera le premier terme alors que l'autre préférera le second. Il est donc très difficile d'avoir un compromis sur ces termes. Mais, nous avons prouvé que les techniques du profil sensoriel peuvent être utilisées pour l'étude des instruments de musique de type cuivre.

Une étude similaire a été réalisée sur des sons de moteurs diesel, en collaboration avec PSA Peugeot Citroën. Un des objectifs a été de réaliser l'évaluation sensorielle des sons par des sujets naïfs (étudiants de l'Ecole Centrale de Nantes) et de corrélérer les données sensorielles aux métriques psychoacoustiques des sons. Les principaux résultats de cette étude sont présentés en annexe F.

---

# Outils de conception orientée client

<b>3.1</b>	<b>Contexte de l'étude . . . . .</b>	<b>114</b>
<b>3.2</b>	<b>Embouchure à volume variable . . . . .</b>	<b>116</b>
<b>3.3</b>	<b>Méthodes de production des sons . . . . .</b>	<b>117</b>
3.3.1	Bouche artificielle et musicien . . . . .	117
3.3.2	Sons de simulation . . . . .	120
<b>3.4</b>	<b>Tests subjectifs . . . . .</b>	<b>120</b>
3.4.1	Stimuli . . . . .	120
3.4.2	Test 1 : seuil de différenciation . . . . .	121
3.4.3	Test 2 : quantification des différences . . . . .	126
3.4.4	Test 3 : comparaison en brillance . . . . .	132
3.4.5	Test 4 : classement en brillance . . . . .	136
<b>3.5</b>	<b>Etude objective . . . . .</b>	<b>148</b>
3.5.1	Paramètres issus de la courbe d'impédance . . . . .	148
3.5.2	Paramètre issu du signal . . . . .	149
<b>3.6</b>	<b>Corrélations et interprétation des résultats . . . . .</b>	<b>150</b>
3.6.1	Corrélation Brillance - CGS . . . . .	150
3.6.2	Corrélation Brillance - paramètres de la courbe d'im- pédance . . . . .	151
<b>3.7</b>	<b>Conclusions . . . . .</b>	<b>158</b>

Après avoir pris en compte les perceptions de l'utilisateur, donc du trompettiste dans le chapitre 2, nous avons décidé de nous placer dans ce chapitre du côté de l'auditeur. Cette deuxième étude met en jeu non plus les instruments eux-mêmes mais les sons produits par ces instruments. Il ne s'agit donc plus d'évaluations en situation de jeu mais de tests d'écoute. Nous nous intéressons aux différences perçues par l'auditeur, par rapport à des changements minimes de la géométrie des trompettes. Le premier objectif de ce travail est de relier des données objectives (issues de la courbe d'impédance ou de signaux de pression rayonnée) à des données subjectives (issues de tests perceptifs). Le second objectif est de valider perceptivement des outils de conception et de mise au point d'instruments que sont la bouche artificielle et les simulations par modèle physique.

Pour créer une famille de trompettes, nous avons développé une embouchure à volume variable, dont la cuvette peut varier de manière continue d'une position profonde à une position relevée. Les sons sont produits de trois manières :

- joués par la bouche artificielle ;
- joués par le musicien ;
- produits par simulation numérique.

Les objectifs de cette étude sont d'étudier :

- l'influence de la profondeur d'embouchure sur la perception des sons de trompette ;
- la capacité d'un musicien, de la bouche artificielle ou des simulations à montrer ces différences perceptives ;
- la corrélation entre les données subjectives d'évaluation sur un attribut particulier du timbre : la brillance, et les caractéristiques physiques extraites des courbes d'impédance.

Après un rappel du contexte de l'étude, nous décrivons l'embouchure à profondeur variable. Ensuite, nous détaillons les méthodes de production des sons, avant de présenter les tests perceptifs mis en place. Le deuxième volet de l'étude concerne les données objectives puis, dans un dernier temps, nous présenterons les corrélations de ces dernières avec les données subjectives.

### 3.1 Contexte de l'étude

L'étude de la qualité des instruments de musique est particulièrement intéressante pour aider leur développement et pour améliorer les procédures d'évaluation de la qualité. Dans la littérature existante, vue au chapitre 1, deux types d'études abordent le sujet. D'une part, les études perceptives, qui visent à caractériser la réponse perceptive donnée par un musicien ou un auditeur. D'autre part, les études objectives, qui visent à déterminer quelles mesures physiques régissent la qualité perçue de l'instrument.

En parallèle, ces dernières années, les simulations par modèle physique [ADA 95] ont fourni des résultats intéressants pour comprendre le fonctionnement des instruments de musique de type cuivre. Elles pourraient, sous réserve de perfectionnement de la méthode de simulation numérique et du modèle physique du couple (instrumentiste - instrument), être employées par des facteurs d'instruments dans le processus d'innovation et de développement d'instruments nouveaux. Farina et Tronchin [FAR 00] proposent une évaluation de certains attributs de la qualité d'un instrument sur un prototype virtuel, en utilisant des sons de simulation.

Concernant les instruments de type cuivre, les études sur la qualité des instruments utilisent la mesure physique principale des cuivres : l'impédance d'entrée. Afin de proposer un modèle prédictif de certaines qualités des cuivres, l'approche consiste à établir des corrélations pour un ensemble d'instruments entre la réponse subjective (donnée par le sujet) et les mesures (extraites de la courbe d'impédance)[PRA 78]. Une des difficultés de ces expériences est tout d'abord d'être sûr que les différences entre les instruments seront représentées par l'impédance<sup>1</sup>. Ensuite, il est très intéressant d'isoler un paramètre de la géométrie de la perce et de le faire varier en commandant finement ses variations, afin d'être sûr que les différences observées dans l'évaluation subjective sont effectivement dues à ces variations. D'autres études, visant à établir l'influence de l'embouchure sur le son perçu, ont déjà été réalisées. L'influence du volume de la cuvette d'embouchure et des pics d'impédance n'est plus à prouver [PLI 99].

Soulignons dans ces études que beaucoup de paramètres géométriques changent d'une embouchure à l'autre, et qu'il devient très difficile d'identifier quel paramètre est le plus influent sur l'évaluation subjective. Afin d'isoler et commander finement les variables qui influencent la qualité de timbre des instruments de type cuivre, nous avons développé une embouchure de trompette avec une profondeur qui varie facilement et de façon continue, de "relevé" à "profond". Utilisant ce dispositif associé à la même trompette, nous avons produit un ensemble d'instruments de comportement acoustique différent, en changeant seulement la géométrie interne de l'embouchure. Cet ensemble d'instruments a été évalué de deux manières :

- subjectivement d'une part, relativement à la "brillance". Cet attribut particulier du timbre des sons, joués par un musicien et une bouche artificielle, ou créés par simulations numériques, a été évalué grâce à des tests d'écoute [PET 03] ;
- objectivement d'autre part, grâce aux mesures d'impédance d'entrée des instruments.

---

<sup>1</sup>Exemple de paramètres très influents sur la qualité subjective et qui ne sont pas présents dans l'impédance : l'image de marque ou bien le diamètre de bord de l'embouchure



Les objectifs de ce chapitre sont de :

- montrer comment un changement de la profondeur de l’embouchure influence la courbe d’impédance et la perception de la brillance des sons ;
- étudier dans quelle mesure des sons produits par un musicien, une bouche artificielle, ou par des simulations par modèle physique sont perçus différemment ;
- savoir si la perception des sons de simulation évolue dans le même sens que la perception des sons joués par un musicien ou une bouche artificielle, et si les simulations sont assez fines pour montrer des différences perceptives subtiles entre les sons ;
- trouver des indicateurs extraits de la courbe d’impédance corrélés avec l’évaluation de la brillance, afin de prévoir cette évaluation subjective par des mesures objectives, et aider finalement la conception des instruments.

Les chapitres suivants présentent les dispositifs expérimentaux et les procédures utilisés pour l’étude. Après l’explication de l’embouchure variable, les procédures employées pour produire des sons de trompette sont rappelées. Les 4 tests d’écoute sont ensuite présentés successivement, donnant pour chacun son déroulement puis ses résultats. Nous proposons enfin les conclusions et les perspectives dans le dernier chapitre.

## 3.2 Embouchure à volume variable

L’embouchure de la trompette, et plus généralement de tous les instruments de la famille des cuivres, joue un rôle primordial tant pour le ”confort” global du musicien que pour la production du son. Il est cependant difficile d’étudier les corrélations entre la géométrie de l’embouchure et le son produit. Comparer deux embouchures en tentant d’expliquer les différences perçues n’est pas un problème simple car beaucoup de paramètres changent en même temps (la forme de la cuvette, l’épaisseur des bords, la géométrie de la queue...) [PLI 99]. Pour cette raison, nous avons développé une embouchure spéciale pour laquelle un paramètre géométrique simple, la profondeur de la cuvette d’embouchure, peut être paramétré. Ce système est constitué d’une vis micrométrique de pas 0.5, qui augmente donc la profondeur de la cuvette d’embouchure de 0.5 mm par tour (Figure 3.1).

L’embouchure peut évoluer facilement et de façon continue de la position repérée T0 ”relevé” (0 tours,  $e = 0$  millimètres) à T10 ”profond” (10 tours,  $e = 5$  millimètres) (Figure 3.2). L’embouchure est conçue de manière à ce que la variation entre l’instrument avec  $i$  tours d’embouchure ( $T_i$ ) et l’instrument avec  $i+1$  tours d’embouchure ( $T_{i+1}$ ) soit équivalente à l’addition d’un cylindre d’épaisseur  $e$ , avec  $e = i \cdot 0.5$  mm, et de diamètre  $\phi$  (Figure 3.2).

Seules les onze premières positions de l’embouchure, de T0 (relevé) à T10 (profond) ont été conservées pour l’étude, car au delà de 10 tours, l’instrument devient considérablement

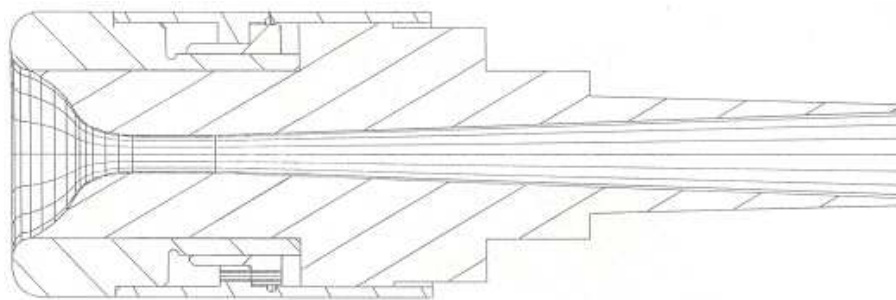


Figure 3.1: Dessin de l'embouchure variable

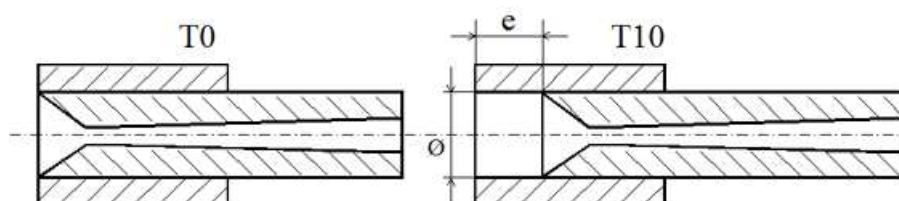


Figure 3.2: Schéma de l'embouchure variable

dénaturé voire injouable. Cette embouchure, associée à la même trompette (modèle 1335 de Yamaha), permet de créer une famille de 11 instruments différents, nommés  $T_i$  ( $i = 0$  à 10, nombre de tours).

Cette famille d'instruments est l'ensemble de référence pour les tests subjectifs et les mesures objectives présentés dans les prochains chapitres.

### 3.3 Méthodes de production des sons

#### 3.3.1 Bouche artificielle et musicien

De nombreux auteurs ont travaillé sur la bouche artificielle puisque ce dispositif semble incontournable pour avoir des mesures reproductibles [GIL 98]. Comme il est possible de commander finement l'embouchure et que l'air est généré par une machine, cela permet d'avoir des conditions expérimentales reproductibles et d'effectuer des mesures en condition de jeu stables et contrôlables. Il a été prouvé [PET 03] que des mesures avec la bouche artificielle permettent d'exhiber des différences entre deux instruments différents. De cette façon, elle pourrait être employée comme banc d'essai pour des fabricants d'instruments.

La bouche artificielle pour les instruments en cuivre se compose principalement des "lèvres artificielles" (tubes de latex remplis avec de l'eau) dont les caractéristiques de vibration sont principalement commandées par la pression de l'eau et la pression mécanique exercée par une "mâchoire artificielle" (Figure 3.3). La surpression d'air dans la cavité buccale est un autre paramètre essentiel pour la commande du système.

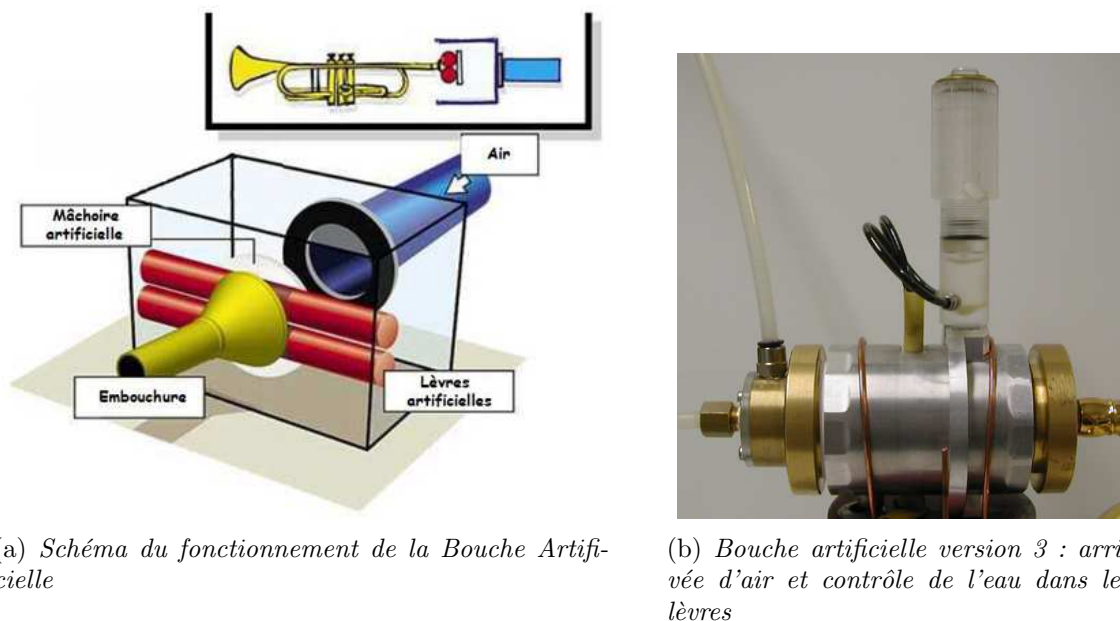


Figure 3.3: La bouche artificielle

Pour notre étude, plusieurs catégories de sons, produits par la bouche artificielle ou par un musicien, ont été enregistrées. Tous les enregistrements ont été réalisés dans les mêmes conditions :

- fréquence d'échantillonnage 44100 hertz, 16 bits ;
- salle 003 de l'Irccyn : même endroit de la salle, même température ;
- microphone Sennheiser e604, carte son Digigram VX Pocket v2 : même chaîne d'acquisition.

Deux microphones ont été placés dans l'axe du pavillon à une distance de 10 cm pour le premier, le deuxième formant un angle de  $45^\circ$  avec celui-ci (Figure 3.4). Nous avons utilisé 2 microphones pour connaître les différences perçues entre deux positions de l'auditeur. Cependant, nous n'avons à ce jour exploité que les sons enregistrés par le premier microphone.



Figure 3.4: Placement des microphones au voisinage du pavillon de la trompette

Ces microphones sont reliés au préamplificateur et à la carte son Digigram VX Pocket v2.

La dynamique du son est mesurée avec un sonomètre placé en sortie de pavillon.

Pour les onze positions de l'embouchure (T0 à T10), deux notes, Sib3 et Do4, ont été enregistrées. Trois catégories de notes ont été considérées :

- BA : joué par la bouche artificielle, avec une dynamique *forte* (115 dB);
- MF : joué par le musicien, dynamique *mezzo forte* (100 dB);
- MP: joué par le musicien, dynamique *piano* (80 dB).

Sur une dizaine de secondes d'enregistrement, une fenêtre de 600ms de signal a été sélectionnée, dans la partie la plus stable en fréquence et en amplitude. Chaque échantillon, segment du signal en régime stationnaire, a ensuite été normalisé en intensité ( $I_{RMS}$ ) (Equation 3.1) et en fréquence avec un logiciel de traitement du signal.

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (3.1)$$

Pour éviter toute différenciation par les sujets sur un critère d'intensité perçue, une normalisation en Sonie (intensité perçue) aurait été plus exacte mais nous faisons l'hypothèse que les sons sont tellement proches qu'une normalisation en Sonie aurait donné un résultat équivalent à une normalisation en intensité RMS. Nous supposons qu'il en est de même pour la hauteur et le pitch (hauteur perçue).

Un transitoire d'attaque et une extinction linéaires de 50 ms ont été ajoutés aux échantillons pour éviter un "click" d'attaque ou de coupure à l'écoute (Figure 3.5).

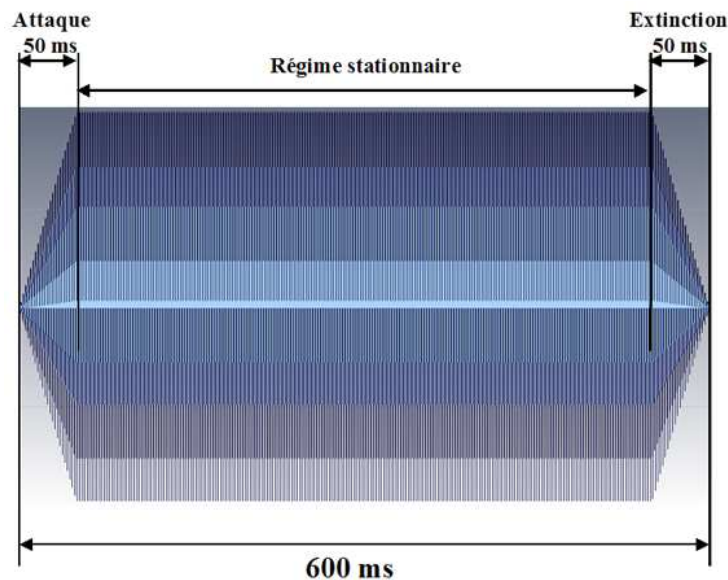


Figure 3.5: Forme du signal proposé comme stimuli aux tests

Afin de limiter autant que possible la variabilité inhérente au musicien, celui-ci a été invité à jouer la note de la manière la plus naturelle possible, c'est-à-dire sans essayer de "corriger" la hauteur ou le timbre des sons.

### 3.3.2 Sons de simulation

Les sons sont produits par un musicien ou par une bouche artificielle, mais ils peuvent également être produits en l'absence d'instrument par des simulations numériques. Il s'agit, comme expliqué dans le chapitre 1, de trouver les solutions approchées du modèle acoustique de la trompette (4 équations). Beaucoup d'auteurs ont tenté de modéliser des instruments à vent afin de les utiliser pour la synthèse (appelée la synthèse par modèle physique) ou de comprendre le comportement physique de ces instruments. La première simulation d'instrument à vent dans le domaine temporel apparaît dans la littérature pour la clarinette en 1981 [SCH 81]. Cette méthode a été adaptée afin d'étudier des instruments plus réalistes en employant l'impédance mesurée comme paramètre d'entrée des simulations (par exemple [GAZ 94]). Une des alternatives à l'approche temporelle est une simulation caractérisant l'oscillation périodique en régime permanent en utilisant un calcul de leur spectre. Cette méthode asymptotique basée sur la technique de l'équilibrage harmonique a été employée la première fois par Schumacher [SCH 78] et par Gilbert [GIL 89]. Cette technique de l'équilibrage harmonique pouvant facilement montrer l'évolution des solutions autour d'un paramètre du modèle physique, elle est retenue ici pour étudier l'évolution des sons simulés par rapport au paramètre de profondeur de cuvette d'embouchure de la trompette. L'augmentation de la profondeur de l'embouchure est modélisée par l'ajout d'un cylindre de longueur équivalente en tête d'embouchure. Le même fenêtrage pour le transitoire d'attaque et d'extinction a été appliqué à ces stimuli.

Une fois tous ces sons préparés, ils ont servi de stimuli dans différents tests perceptifs.

## 3.4 Tests subjectifs

Les tests subjectifs sont pour cette étude psychoacoustique des tests d'écoute. Les tests ont été effectués par plusieurs sujets et impliquent des stimuli composés des sons appartenant aux catégories décrites dans le paragraphe précédent. Nous décrivons dans ce chapitre comment les stimuli ont été conçus, et nous présentons en détail les 4 tests d'écoute que nous avons réalisés avec l'embouchure à profondeur variable.

### 3.4.1 Stimuli

Les stimuli des tests d'écoute sont composés des sons décrits plus haut, appartenant aux quatre catégories suivantes :

- BA : son produit par la bouche artificielle à une nuance *forte*;
- MF : son produit par un musicien à une nuance *mezzo forte*;
- MP : son produit par un musicien à une nuance *piano*;

- Simu : son produit par les simulations numériques.

Ils sont soit utilisés tel quels en tant que stimuli, soit regroupés par paires. Une paire de sons est constituée de sons de la même famille séparés de 600ms de silence (Figure 3.6).

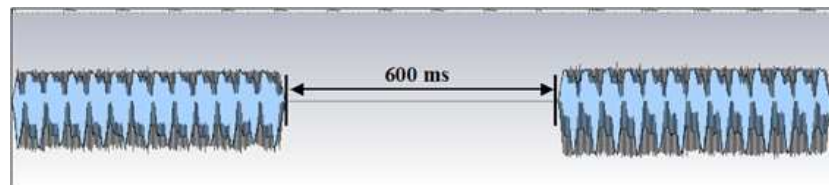


Figure 3.6: Paire de sons, stimulus des tests de comparaison par paires

Les sujets écoutent les sons avec un casque Audio-technica ATH-M40.

### 3.4.2 Test 1 : seuil de différenciation

Le premier test proposé est une épreuve discriminative. Il vise donc par définition à détecter la présence ou l'absence de différences sensorielles entre deux produits. Les variations de profondeur d'embouchure des instruments (T0 à T10) étant très faibles, le but de ce premier test est d'estimer si les différences de timbre correspondant aux différents instruments peuvent être perçues. Cette évaluation des différences perçues a été réalisée par un test de comparaison par paires.

Les objectifs de ce test sont :

- évaluer pour chaque catégorie de sons le seuil de différenciation ;
- montrer si la valeur de ce seuil dépend de la catégorie (BA, MF, MP ou Simu) ;
- étudier l'influence du partiel joué sur les différences perçues.

#### 3.4.2.1 Déroulement du test

Afin de limiter la durée du test, seulement 5 sons (correspondant aux positions T0, T2, T5, T6, T10) ont été choisis pour chaque catégorie. Ce choix a été fait pour maximiser le nombre d'écarts (en nombres de tours) différents entre deux positions d'embouchure. Ils ont permis de tester :

- 1 tour entre la position de T5 et de T6 ;
- 2 tours entre la position de T0 et de T2 ;
- 3 tours entre la position de T2 et de T5 ;
- 4 tours entre la position de T2 et de T6 ;
- 5 tours entre la position de T0 et de T5 et entre T5 et T10 ;
- 6 tours entre la position de T0 et de T6 ;
- 8 tours entre la position de T2 et de T10 ;

- 10 tours entre la position de T0 et de T10.

Toutes les 10 paires possibles parmi les 5 sons sont considérées : T0-T2, T0-T5, T0-T6, T0-T10, T2-T5, T2-T6, T2-T10, T5-T6, T5-T10, T6-T10. Un stimulus typique du test 1 (par exemple Bb3, BA T0-T6) est composé d'une paire de sons de la même catégorie (par exemple AM, MF, MP ou Simu), et correspondant à la même note, séparée par 600ms de silence. Afin de tester la fiabilité du sujet, une paire de sons identiques (T5-T5) a été ajoutée aux stimuli. Au total, 11 paires de sons, par catégorie (AM, MF, MP ou Simu), constituent les stimuli du test 1. Les paires proposées pour l'évaluation sont identifiées par une croix dans le tableau 3.1<sup>2</sup>.

		Instrument pour son 2				
		T0	T2	T5	T6	T10
Instrument pour son 1	T0		x	x	x	x
	T2			x		
	T5			x		
	T6		x	x		x
	T10		x	x		

Tableau 3.1: Les onze paires de sons proposées dans les évaluations subjectives

Ce test a été réalisé sur deux notes, la note Sib3 et la note Do4, afin d'évaluer l'influence du partiel sur la perception des différences. Un total de 20 sujets a participé au test 1 sur la note Sib3 et 11 sur la note Do4.

Les paires ont été présentées trois fois à chaque sujet, afin de contrôler leur répétabilité. L'ordre de présentation a été choisi aléatoirement, afin de s'affranchir de l'effet d'ordre. La consigne donnée aux sujets était d'indiquer si les deux sons d'une paire étaient différents ou identiques. Ils peuvent écouter la paire autant de fois qu'ils le souhaitent, et donnent leurs réponses en cliquant sur des boutons par l'intermédiaire d'une interface programmée en VisualBasic6 (Figure 3.7).

En raison de contraintes de temps, le test 1 a été réalisé en deux parties. Dans un premier temps, les sujets ont évalué toutes les paires des catégories BA, MF et MP. Il y avait donc, pour chaque note, 99 paires de sons (11 paires \* 3 catégories \* 3 répliques). En deuxième session, les sujets ont évalué toutes les paires de la catégorie Simu pour la note Sib3, ce qui fait un total de 33 paires : 11 paires \* 1 catégorie \* 3 répliques.

En plus des ces évaluations, les sujets sont invités à indiquer à la fin des évaluations les termes les plus appropriés pour décrire les différences perçues entre les sons.

<sup>2</sup>Le tableau 3.1 n'est pas représenté par une matrice triangulaire supérieure car il respecte l'ordre de passage des sons dans une paire.

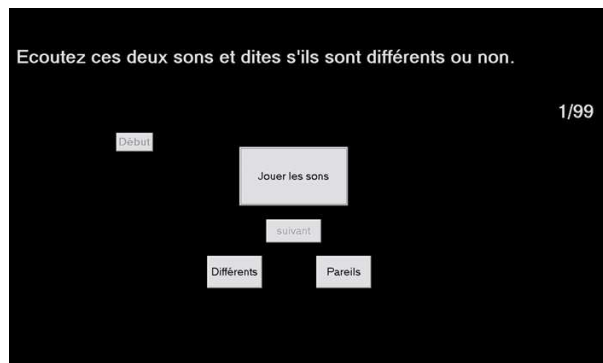


Figure 3.7: Interface du test 1

### 3.4.2.2 Résultats du test 1

Pour les sujets ayant qualifié de différents les sons de la paires T5-T5, donc ayant entendu une différence là où il n'y en avait pas, nous avons pris le parti de ne pas retenir leurs résultats. Nous avons donc dû rejeter 3 sujets pour le test sur Sib3 et 2 sur Do4.

Les résultats sont donnés dans les tableaux 3.2, 3.3, 3.4 et 3.5 sous forme de pourcentage. Chaque paire a été affectée de la valeur 0 si les sons étaient perçus comme identiques et de la valeur 1 sinon. Pour chaque paire, les réponses des sujets ont été additionnées et mises en pourcentage. Ainsi, 100% signifie que tous les sujets ont trouvé, à chaque fois qu'ils l'ont entendu, les sons de la paire comme " différents ", et 0% signifie que les sons de la paire ont toujours été évalués comme " identiques " par tous les sujets.

<b>BA</b>		Instr. pour son 2				
note : Sib3		T0	T2	T5	T6	T10
Instr. pour son 1	T0		59	74	100	100
	T2			78		
	T5			0		
	T6		78	48		30
	T10		100	81		

<b>BA</b>		Instr. pour son 2				
note : Do4		T0	T2	T5	T6	T10
Instr. pour son 1	T0		43	88	96	100
	T2			61		
	T5			0		
	T6		80	53		96
	T10		100	98		

Tableau 3.2: Résultats du test 1 pour les sons de la catégorie BA

<b>MF</b>		Instr. pour son 2				
note : Sib3		T0	T2	T5	T6	T10
Instr. pour son 1	T0		7	41	89	100
	T2			48		
	T5			0		
	T6		81	33		100
	T10		100	93		

<b>MF</b>		Instr. pour son 2				
note : Do4		T0	T2	T5	T6	T10
Instr. pour son 1	T0		57	86	98	94
	T2			76		
	T5			0		
	T6		69	41		55
	T10		96	59		

Tableau 3.3: Résultats du test 1 pour les sons de la catégorie MF



MP		Instr. pour son 2				
note : Sib3		T0	T2	T5	T6	T10
Instr. pour son 1	T0		33	52	63	81
	T2			59		
	T5			0		
	T6		85	0		48
	T10		100	4		

MP		Instr. pour son 2				
note : Do4		T0	T2	T5	T6	T10
Instr. pour son 1	T0		53	76	61	80
	T2			6		
	T5			0		
	T6		14	4		59
	T10		84	41		

Tableau 3.4: Résultats du test 1 pour les sons de la catégorie MP

Simu		Instr. pour son 2				
note : Sib3		T0	T2	T5	T6	T10
Instr. pour son 1	T0		46	69	80	94
	T2			50		
	T5			0		
	T6		48	15		56
	T10		91	48		

Tableau 3.5: Résultats du test 1 pour les sons de la catégorie Simu pour la note Sib3

Au vu de ces tableaux, les réponses des sujets semblent très proches d'un partiel (Sib3) à l'autre (Do4). Dans la suite de l'étude, nous allons donc présenter plus en détail les résultats et les conclusions sur cette note Sib3, puisque le test avec les simulations est réalisé avec cette note.

Les résultats montrent la même tendance pour toutes les catégories de sons : plus la différence de profondeur d'embouchure est grande, plus le pourcentage de réponses correctes est élevé, c'est-à-dire plus les sons sont perçus comme différents. Autrement dit, plus la différence de profondeur d'embouchure est grande, plus la différenciation de timbre est fine. Les résultats indiquent en particulier que les différences entre les sons simulés évoluent de la même manière que pour les sons joués par un musicien ou par la bouche artificielle. Les simulations peuvent reproduire des différences entre les sons similaires à celles des sons joués. Ce résultat, non évident au commencement de l'étude, est une première conclusion importante.

Afin d'évaluer le seuil de différenciation pour chaque catégorie de sons, deux critères sont calculés. Le premier est basé sur un test statistique. Étant donné que le test 1 est une question à choix forcé (1 réponse obligatoire parmi 2 possibles, "identique" ou "différent"), elle s'apparente à une épreuve dite de Bernoulli. Le principe est détaillé dans le paragraphe suivant. Le sujet n'ayant que deux possibilités de réponse, nous devons, pour ce type d'épreuve, vérifier le risque d'obtenir de tels résultats au hasard. La loi statistique adaptée dans ce cas est la loi binomiale [DEP 98].

Par définition, une épreuve de Bernoulli de paramètre  $p$  est une expérience aléatoire,

c'est-à-dire soumise au hasard comportant 2 issues : le "succès" ou l'"échec".  $p$  représente la probabilité d'un "succès", et  $q$  celle d'un "échec" ( $q = 1 - p$ ). Lorsque l'on répète  $n$  fois, de manière indépendante, une épreuve de Bernoulli de paramètre  $p$ , la variable aléatoire  $X$  devient la somme des  $p$ , c'est-à-dire le nombre de "succès" obtenus à l'issue des  $n$  expériences. La variable aléatoire suit une loi de probabilité définie par :

$$P(X = k) = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k} \quad (3.2)$$

avec  $C_n^k$  le nombre de combinaisons possibles de  $k$  éléments dans un ensemble de taille  $n$ ,  $p^k$  est la probabilité de "succès" et  $p^{n-k}$  la probabilité d'"échec".  $P(X=k)$  signifie la probabilité pour que  $X$  se produise  $k$  fois sur les  $n$  épreuves, donc, qu'il y ait  $k$  succès.

Dans notre cas, le succès est remplacé par le qualificatif "différent" et l'échec par "identique". Les probabilités d'obtenir au hasard l'une ou l'autre réponse sont les mêmes, donc chacune égale à 0.5. Pour chaque valeur du tableau, la loi binomiale est calculée. Par exemple, pour la paire T0-T5 de la bouche artificielle, il y a eu 45 réponses "différents" sur les 17 sujets \* 3 réplications = 51 réponses. La probabilité que les réponses aient été données au hasard est égale à  $P(X=45) = C_{51}^{45} 0.5^{(51-45)} \cdot 0.5^{45}$  donc très faible ( $8.10^{-7}\%$ ). Cela signifie que les réponses données par les sujets ont été volontaires, donc que les sujets sont fiables. En choisissant un seuil d'acceptabilité de 5%, les paires pour lesquelles le risque d'avoir ces résultats au hasard est supérieur à 5% sont grisées dans les tableaux 3.2, 3.3, 3.4 et 3.5. Ces paires représentent les cas où le jugement des sujets ne peut pas être considéré comme fiable puisque trop proche d'un résultat qui pourrait être trouvé au hasard. Le nombre de paires concernées est indiqué dans le tableau 3.6.

Le deuxième critère pour estimer le seuil de différenciation est le pourcentage moyen de réponses correctes pour toutes les paires testées. Ces deux critères sont donnés pour chaque catégorie de sons dans le tableau 3.6.

Catégorie	Sib3		Do4	
	Nb de paires éliminées par la loi binomiale	Pourcentage moyen de bonnes réponses	Nb de paires éliminées par la loi binomiale	Pourcentage moyen de bonnes réponses
BA	2	81.5%	2	74.8%
MF	2	73.1%	2	69.3%
Simu	5	59.7%	-	-
MP	5	47.8%	4	52.6%

Tableau 3.6: Classement des catégories de sons en fonction de leur seuil de différenciation

Le but est de dresser un classement des seuils de différenciation. Nous sommes dans le cas d'un classement multicritère. Pour cela, nous avons utilisé la relation de dominance de Pareto : un élément est dominant s'il est au moins aussi bon sur tous les critères et

meilleur sur au moins un des critères. Par exemple, entre les seuils de BA et MF, BA est au moins aussi bon que MF sur le nombre de paires éliminées (2 contre 2) et est même meilleur sur le pourcentage de bonnes réponses. Le seuil de différenciation de BA est donc meilleur que celui de MF. Etant donné que, plus le pourcentage de réponses correctes est élevé et plus le nombre de paires éliminées par le test de la loi binomiale est petit, alors plus le seuil de différenciation est petit.

Nous pouvons donc conclure au classement des seuils (S) de différenciation suivant :  $S_{BA} < S_{MF} < S_{Simu} < S_{MP}$ . Le seuil est donc le plus bas avec les sons produits par la bouche artificielle, ce qui illustre le fait que la bouche artificielle semble être un bon dispositif pour exhiber des différences subtiles entre les instruments. Les différences perçues pour le musicien en nuance *piano* sont moins marquées que pour les autres catégories. Le musicien semble "lisser" les différences entre les instruments, surtout dans la nuance *piano*, qui n'est pas favorable à la mise en évidence des différences de timbre (la dynamique *piano* ne permet pas la génération d'harmoniques d'ordre supérieur).

Ce premier test prouve finalement que les sujets ont perçu des différences entre les sons, même pour de petites variations de l'embouchure de l'instrument. Un deuxième test a été mis en place pour tenter de préciser l'amplitude de ces différences. Pour le cas du musicien jouant dans la nuance *piano*, les différences sont si peu perçues (le seuil est haut) que nous avons décidé d'exclure cette catégorie pour le test n°2.

### 3.4.3 Test 2 : quantification des différences

Le test 1 nous apprend que les petits changements apportés à l'embouchure sont perceptibles par l'auditeur. Pour obtenir une définition plus fine de ces différences, un deuxième test a été mis en place. L'objectif de ce deuxième test est de quantifier les différences perçues entre les instruments.

#### 3.4.3.1 Déroulement du test 2

Le test 2 est également une épreuve discriminative, mais cette fois concernant la description des différences. Pour cette épreuve, les stimuli appartiennent à la catégorie BA (Bouche artificielle) et MF (Musicien mezzo Forte). Compte tenu de la proximité des résultats du test 1 pour Do4 et Sib3, une seule note a été ici testée, Sib3.

##### a - Les stimuli

Les 15 paires qui ont servi de stimuli sont données dans le tableau 3.7. Les paires grisées dans le tableau 3.2 ont été éliminées. Il s'agit des paires T0-T2 et T5-T6. Nous en avons déduit une différenciation impossible entre deux instruments ayant un écart physique de moins de 2 tours d'embouchure. Les paires du test 1 qui ont passé le test statistique font partie des paires retenues pour ce deuxième test. Pour pouvoir observer les tendances de

façon linéaire, chaque son entre 3 et 10 tours d'embouchure est apparié au son produit en position d'origine (T0).

		Instrument pour son 2									
		T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Instrument pour son 1	T0	x		x	x	x	x	x	x	x	x
	T2					x					x
	T3										
	T4										
	T5					x					
	T6		x								x
	T7										
	T8										
	T9										
	T10					x					

Tableau 3.7: Les quinze paires de sons proposées dans le test 2

Il apparait donc deux paires de sons identiques (T0-T0 et T5-T5) car nous gardons comme critère d'élimination des sujets le fait d'entendre une différence là où il n'y en a pas.

### b - L'épreuve

Les paires ont été présentées trois fois à chaque sujet dans un ordre aléatoire. Cela fait un total de 45 évaluations par famille donc 90 paires à tester ( $15 \times 3 \times 2$ ). La consigne donnée aux sujets était : "Ecoutez ces deux sons et qualifiez leur différence." Quatre réponses étaient proposées : "identiques", "un peu différents", "différents" ou "très différents". Pour aider le sujet à se familiariser avec ces stimuli, l'épreuve était précédée d'une présentation des bornes de l'échelle grâce à deux paires opposées : l'une était constituée de deux sons identiques et l'autre de deux sons perçus différents puisqu'ayant eu 100% de différenciation lors du test 1.

Equipé d'un casque (Audio-technica ATH-M40), chaque sujet répond via l'interface représentée figure 3.8. Un total de 26 sujets a participé au test 2.

#### 3.4.3.2 Résultats du test 2

Ayant perçu une différence entre 2 sons identiques, 6 sujets ont été éliminés.

Chaque réponse proposée est codée de la façon suivante :

- 0 pour "identiques";
- 1 pour "un peu différents";
- 2 pour "différents";



(a) Page d'accueil



(b) Durant le test

Figure 3.8: Interface du test 2

- 3 pour "très différents".

Les résultats des 20 sujets retenus ont été additionnés et sont donnés en tableau 3.8. Ils représentent la dissimilarité perçue entre les sons. Ainsi, chaque son étant présenté 3 fois et la note maximale pour une paire étant 3, une note de 180 ( $20 \times 3 \times 3$ ) signifie que la paire de sons a été à chaque présentation notée comme composée de sons très différents. En général, plus la note totale est élevée, plus les sujets ont perçu une différence entre les sons.

La première remarque sur ces résultats est la différence entre BA et MF. Les pourcentages sont plus élevés pour les sons produits par la bouche artificielle, ce qui signifie que les sons produits par le musicien MF sont moins différenciés. Ce constat est en accord avec le premier test qui donnait un seuil de différenciation plus bas pour la BA.

La deuxième remarque porte sur la tendance suivie par les résultats : en général, plus

BA		Instrument pour son 2									
		T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Instrument pour son 1	T0	0		93	66	90	139	154	138	146	156
	T2					45					132
	T3										
	T4										
	T5					0					
	T6		78								100
	T7										
	T8										
	T9										
	T10					86					

MF		Instrument pour son 2									
		T0	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Instrument pour son 1	T0	0		54	46	80	112	62	93	111	131
	T2					66					126
	T3										
	T4										
	T5					0					
	T6		66								28
	T7										
	T8										
	T9										
	T10					46					

Tableau 3.8: Résultats du test 2 pour les sons produits par la bouche artificielle BA (en haut) et par un musicien MF (en bas), en pourcentage.

le nombre de tours de différence entre deux sons est grand, plus cette différence perçue est grande.

La troisième remarque porte sur le fait que, en plus du nombre de tours de différence, l'échantillon de base de la paire semble important. Prenons les résultats de la BA : les quatre mêmes tours séparent l'échantillon T0 de T4, les échantillons T2 et T6, et T6 et T10. Pourtant, les résultats sont assez éloignés (66, 78 et 100). Il en est de même pour les échantillons T0-T3 et T2-T5 séparés de 3 tours. Leurs pourcentages respectifs sont 93 et 45. Les différences perçues ne sont donc pas seulement dues à l'écart des positions d'embouchures mais également à quelles positions sur les 11 proposées se situent les échantillons. Le même constat peut être fait sur les résultats du MF. Pour comparer l'évolution des différences perçues en fonction de la différence de tours sans avoir l'influence de la position de l'échantillon de base, nous allons nous focaliser sur la première ligne de chaque matrice de résultat, soit les paires comparant les autres instruments à T0.

Le tableau 3.9 donne la moyenne et l'écart-type des réponses des sujets pour les paires contenant T0.

BA	Moyenne	Ecart-type	MF	Moyenne	Ecart-type
T0-T0	0	0	T0-T0	0	0
T0-T3	1.55	0.49	T0-T3	0.9	0.59
T0-T4	1.1	0.46	T0-T4	0.77	0.5
T0-T5	1.5	0.41	T0-T5	1.33	0.45
T0-T6	2.32	0.74	T0-T6	1.87	0.55
T0-T7	2.57	0.34	T0-T7	1.03	0.36
T0-T8	2.3	0.52	T0-T8	1.55	0.55
T0-T9	2.43	0.36	T0-T9	1.85	0.58
T0-T10	2.6	0.41	T0-T10	2.18	0.43

Tableau 3.9: Moyenne et écart-type des scores des paires référencées à T0

Ces résultats sont représentés sous forme de diagrammes en bâtons (figure 3.9).

Ce test nous permet d'étudier plus finement le seuil de distinction des différences. La figure 3.9 représente pour chaque paire partant de T0 la moyenne et l'écart-type des "notes" attribuées à la paire.

Pour la bouche artificielle, une marche se dessine entre les 3 premiers échantillons et les 5 suivants. Le seuil en différence perçue semble être autour de 2 (sons "différents"). Avec l'hypothèse que le panel est homogène, les trois premiers échantillons n'ont donc jamais ou rarement été notés comme ayant une très grande différence. De la même façon, pour avoir une moyenne supérieure à 2, les 5 dernières paires ont été évaluées comme composées de sons différents voire très différents. Ces deux groupes se retrouvent avec le calcul des différences de moyennes entre les paires. L'écart est faible à l'intérieur des groupes mais élevé entre des paires de groupes différents. La limite se situe donc entre la

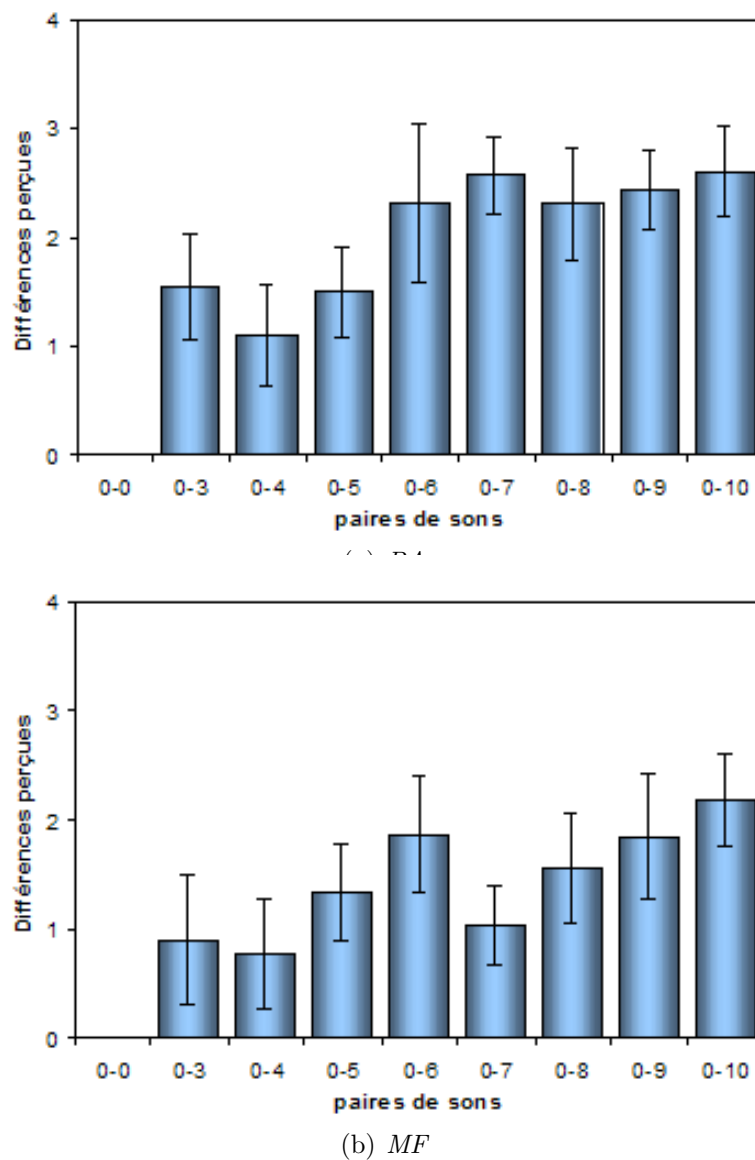


Figure 3.9: Représentation moyenne et écart-type des paires référencées à T0

troisième et la quatrième paire, soit à partir de 6 tours d’embouchure d’écart. Le seuil se situerait donc entre 5 et 6 tours d’embouchure.

Pour les sons de la catégorie MF, le seuil est beaucoup moins net, voire inexistant. Cela vient certainement du fait que le musicien compense et lisse les différences produites par la variation de l’embouchure.

Pour résumer, la conclusion majeure de ce test est la détection d’un seuil pour des sons issus de la BA. Le premier test a permis de prouver que la BA permet de montrer des différences perceptives entre les sons. Ce deuxième test l’a confirmé et a donné une bonne corrélation entre la différence physique (nombre de tours d’embouchure) et la quantification des différences perçues. Ces tests nous ont permis de montrer que les résultats de la BA suivent la même tendance que pour le MF. La bouche artificielle semble même



exhiber des différences plus importantes entre les sons que le musicien. Elle pourrait donc être un banc d'essai pour montrer des différences entre différentes trompettes.

### 3.4.4 Test 3 : comparaison en brillance

Après avoir étudié les différences entre les sons (test 1), leur valeur (test 2), nous étudions maintenant la nature de ces différences. Il s'agit désormais non plus d'épreuves discriminatives mais descriptives. Les sujets participant à ce 3<sup>ème</sup> test sont les mêmes que ceux du test 2 précédent.

Tous les stimuli sont normalisés en fréquence et en intensité. Pourtant, les sujets perçoivent des différences, assez nettes pour la BA. C'est donc la troisième composante du son, le timbre de l'instrument, qui permet au sujet de différencier les sons. Nous avons tenté d'expliquer ces différences sur une échelle de brillance.

#### 3.4.4.1 Déroulement du test 3

Nous nous sommes concentrés pour le test 3 sur un attribut particulier du timbre : la brillance du son. A la fin du test 1, les sujets devaient donner les termes qui qualifiaient pour eux les différences perçues. Le tableau 3.10 regroupe les termes générés et leur occurrence. Ces termes sont regroupés en plusieurs familles :

- la hauteur des notes (fréquence, tonalité...) ;
- l'intensité des notes (volume, amplitude...) ;
- les parasites des sons (grésillements, souffle...) ;
- le timbre des sons (claire, brillance...) ;
- l'ouverture de l'instrument (fermé, pincé, ouvert) ;
- et autres termes isolés.

Comme exprimé dans la "préparation" des stimuli, les sons sont normalisés en hauteur et en intensité. Les termes de sensations de différences en hauteur ou en volume nous semblent donc mal adaptés pour expliquer les réponses perceptives. Les 2 premières familles citées (hauteur et intensité) ont donc été mises de côté. Les termes concernant les parasites des sons se rapportaient plus à des imperfections de jeu (léger souffle avec la BA par exemple). Ces termes ont donc été écartés. La notion qui a alors retenu notre attention a été la description du timbre par l'opposition des termes brillant / claire à sourd / sombre. Les études psychoacoustique [KRI 93] ont prouvé que cette dimension est une des dimensions perceptuelles principales du timbre d'un son en régime stationnaire.

L'objectif du test 3 est de trouver une corrélation entre les différences perçues et un attribut subjectif : la brillance. Pour cela, les stimuli du test 2 ont été conservés sauf les 2 paires de sons identiques, ce qui totalise 13 paires pour chaque famille de sons. Chaque

Terme	Occurence	Terme	Occurence
<b>Hauteur</b>		<b>Timbre</b>	
fréquence	4	claire	5
tonalité	6	brillance	4
pitch	1	timbre	4
aigu	2	sourd	2
grave	1	sombre	1
hauteur	6	doux	1
montée	1	formant	1
descente	1	<b>Intensité</b>	
<b>Parasites</b>		volume	2
souffle	4	intensité	2
vibrations	2	amplitude	2
bruit	1	puissance	1
grésillement	1	<b>Termes isolés</b>	
<b>Ouverture</b>		enveloppe	1
ouvert	6	vibrato	1
fermé	3	précision	1
pincé	1		

Tableau 3.10: Résultat de la verbalisation du test 1

stimuli est présenté 3 fois au sujet dans un ordre aléatoire. Les deux familles de sons qui ont été utilisées dans le test sont BA et MF. En résumé, 78 paires de sons ( $13 \times 3 \times 2$ ) ont été présentées au sujet. La consigne de l'épreuve est : "Écoutez ces deux sons. Lequel vous semble le plus "brillant" ? Deux possibilités sont proposées : "le premier" ou "le second". Pour aider à la compréhension du terme "brillant", une fiche est fournie (figure 3.10) et peut être consultée tout au long du test. L'interface de ce test est présentée figure 3.11.

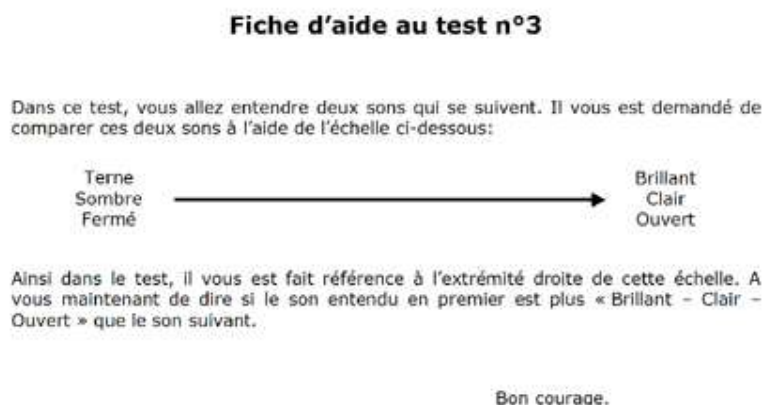


Figure 3.10: Fiche d'aide au test 3

16 sujets ont participé à ce troisième test.



Figure 3.11: Interface du test 3

### 3.4.4.2 Résultats du test 3

Dans les deux premiers tests, le critère de non prise en compte d'un sujet est le fait qu'il entende une différence là où il n'y en a pas. Pour le test 3, l'épreuve descriptive ne permet pas d'évaluer la validité ou non du jugement puisqu'il est totalement perceptif et qu'une réponse "exacte" n'existe pas. Cependant, pour s'assurer que la consigne est bien comprise, que le sujet était répétable et que son jugement peut être considéré comme fiable, nous n'avons conservé que les résultats indiquant pour chaque paire la même évaluation à ses trois passages, soit une constance dans les réponses.

Pour donner un ordre d'idée des hésitations des sujets, le tableau 3.11 présente pour chaque sujet et pour chaque famille de sons le nombre de paires pour lesquelles il n'a pas donné 3 fois la même réponse (sur un total de 13).

Sujet	BA	MF	Sujet	BA	MF
S1	0	9	S9	3	7
S2	1	9	S10	0	7
S3	3	5	S11	3	9
S4	0	7	S12	9	7
S5	0	5	S13	0	4
S6	5	10	S14	0	1
S7	0	3	S15	4	4
S8	0	1	S16	0	3

Tableau 3.11: Nombre de paires pour lesquelles le sujet n'a pas fourni 3 fois la même réponse pour le test 3

La première remarque porte sur l'écart entre les résultats avec les sons de BA et les sons de MF. Sauf pour le sujet 12, qui n'est en général pas répétable, les paires non retenues concernent nettement plus les sons MF. Cela montre une moins bonne différenciation des sons, donc, une hésitation des sujets concernant cette catégorie. Une explication possible est que les différences de brillance sont tellement faibles pour la catégorie MF qu'elles

sont en-dessous du seuil. Les différences ne sont donc pas mieux perçues les unes que les autres.

Testons alors la différenciation des sons sur l'attribut brillance pour les deux familles de sons. Les résultats du test 3 sont présentés dans le tableau 3.12. Les 4 colonnes de droite indiquent le nombre de sujets à avoir répondu 3 fois la même chose pour une paire de son. Si ce nombre  $n$  est dans la colonne "Brillant", cela signifie que la Son 1 a été désigné comme plus brillant que le Son 2 par  $n$  sujets.

Instruments		BA		MF	
Son 1	Son 2	Brillant	Terne	Brillant	Terne
T0	T3	16	0	6	2
T0	T4	15	0	3	2
T0	T5	15	0	4	4
T0	T6	15	1	6	4
T0	T7	14	1	3	6
T0	T8	12	1	4	5
T0	T9	15	1	4	5
T0	T10	15	0	4	5
T2	T5	12	0	10	1
T2	T10	14	0	8	5
T6	T2	0	13	1	10
T6	T10	8	1	2	6
T10	T5	0	11	5	2

Tableau 3.12: Résultats du test 3

Pour la bouche artificielle, en observant l'ordre des paires, le son produit par un instrument en position plus relevée est toujours perçu comme plus brillant que l'autre. Un instrument avec une cuvette plus relevée (position T0) est perçu comme plus brillant. La tendance montre que plus l'embouchure est creusée, plus le son paraît terne. Pour le MF, le nombre de réponses se situe autour de la moyenne : la tendance est beaucoup moins marquée. Les sons produits par le musicien sont trop proches pour être distingués de manière sûre.

Ce test a permis de montrer que la brillance est un critère adapté pour expliquer les différences perceptives entre les instruments pour la catégorie BA. Le fait que les résultats soient plus marqués avec la BA montrent une nouvelle fois la capacité du dispositif à être un bon banc d'essai pour cuivre. Les jugements moins catégoriques pour la catégorie MF confortent l'idée que le musicien compense et lisse les différences de géométrie d'embouchure.

Deux problèmes sont à soulever dans ce test :

- certains sujets ne sont pas reproductibles : faut-il conserver les sujets qui ont un nombre de paires valides inférieur à la moitié du nombre de paires total donc qui ne seraient répétables que pour moins d’une paire sur deux ? ;
- Le relativement petit nombre de paires évaluées implique une matrice de résultats creuse et ne permet pas d’utiliser beaucoup d’outils, comme pour calculer un classement des sons en brillance par exemple.

Pour répondre à la première question, le plan factoriel (figure 3.12) a été tracé à partir du tableau 3.13. Les valeurs du tableau 3.13 sont les sommes des résultats des 3 passages de chaque paire. Une réponse ”plus brillant” vaut +1 et une réponse ”plus terne” vaut -1. Par exemple, -3 signifie que le sujet a répondu 3 fois que le son 1 était plus terne que le son 2 pour la même paire. Le tableau comporte d’abord les 13 paires de catégorie BA puis les 13 paires de catégorie MF.

Trois sous-groupes se dessinent, et mettent à part le sujet 12 qui semble répondre d’une manière différente de tous les autres. Cela n’affecte cependant pas les résultats de l’ensemble du groupe, jugé globalement homogène.

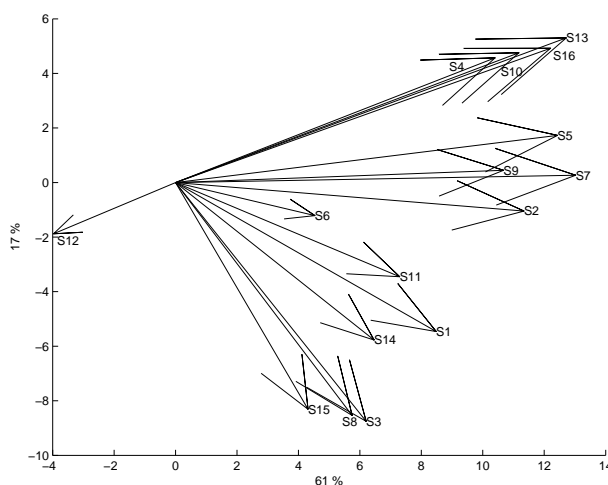


Figure 3.12: Plan factoriel représentant l’homogénéité du panel de sujet

Pour la deuxième remarque, la matrice creuse ne nous permet effectivement pas, par une simple analyse, de faire un classement exact des sons les uns par rapport aux autres. Pour réaliser cette tâche, un 4<sup>e</sup> test a été mis en place.

### 3.4.5 Test 4 : classement en brillance

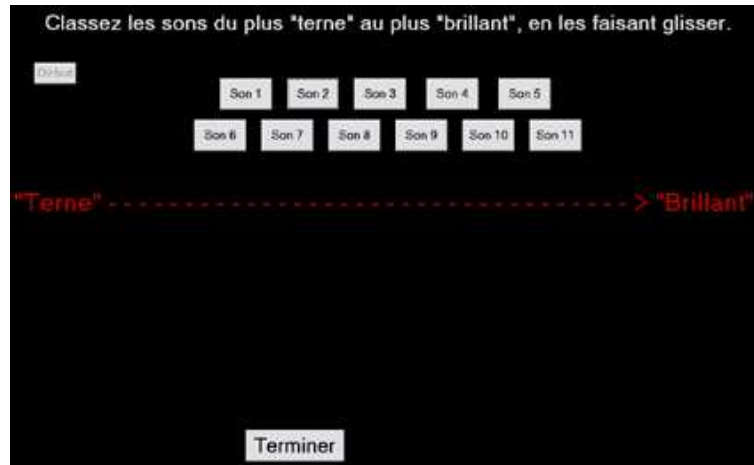
#### 3.4.5.1 Déroulement du test 4

Le test 4 est un test de classement. Pour les catégories des sons MF, BA et Simu, avec les onze sons T0 à T10 en entrée, les sujets ont pour consigne de classer les stimuli sur

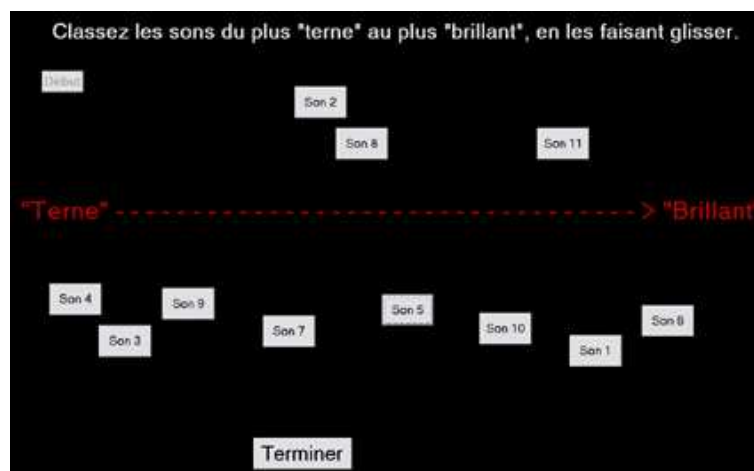
Instruments		Sujets															
Son1	Son2	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
T0	T3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
T0	T4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3
T0	T5	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-1	3	3	3	3
T0	T6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-3	3	3	3	3
T0	T7	3	3	3	3	3	-3	3	3	3	3	3	-1	3	3	3	3
T0	T8	3	3	1	3	3	1	3	3	3	3	3	-3	3	3	1	3
T0	T9	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	-3	3	3	3	3
T0	T10	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3
T2	T5	3	3	1	3	3	3	3	3	1	3	3	-1	3	3	1	3
T2	T10	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	-1	3	3	3	3
T6	T2	-3	-3	-3	-3	-3	1	-3	-3	-3	-3	-1	1	-3	-3	-3	-3
T6	T10	-3	1	-1	3	3	-1	3	3	1	3	1	-1	3	3	1	3
T10	T5	-3	-3	-3	-3	-3	-1	-3	-3	-1	-3	-1	1	-3	-3	-1	-3
T0	T3	-1	1	3	-3	-3	3	1	3	-1	-1	1	-1	1	3	3	3
T0	T4	1	1	-3	3	-1	1	-3	-1	-1	-1	-1	3	-1	3	-1	1
T0	T5	1	-1	3	1	-3	1	-3	3	-1	-1	1	-3	-1	3	3	-3
T0	T6	3	-1	3	-1	1	1	-3	3	-1	-3	3	1	-3	3	3	-3
T0	T7	-1	-3	1	-3	-1	1	-3	3	1	-3	1	-1	-3	3	3	-3
T0	T8	-1	-1	3	-3	-3	-1	-1	3	1	-3	-1	-1	-3	3	3	-3
T0	T9	1	-1	1	-1	-1	3	-3	3	-3	-3	1	1	-3	3	3	-3
T0	T10	1	-3	3	-1	-1	-1	-3	3	-3	-1	-1	1	-3	3	3	-3
T2	T5	3	1	1	1	3	1	3	3	3	3	3	-3	3	3	1	3
T2	T10	3	1	3	-3	-3	-1	3	3	-3	-1	3	3	-3	3	3	-3
T6	T2	-3	-3	-3	1	-3	-1	-3	-3	-3	3	-3	-1	1	-3	-3	-1
T6	T10	-1	-3	-1	-1	-3	-3	-3	3	-3	-1	1	3	-3	-1	1	1
T10	T5	-1	-1	-1	3	3	1	1	-3	1	1	1	-3	3	3	-1	3

Tableau 3.13: Résultats individuels du test 3 : la première partie du tableau concerne la catégorie BA et la deuxième la catégorie MF

une échelle allant de "terne" à "brillant" à partir d'une interface de type "cliquer-déplacer" programmée en VisualBasic6, figure 3.13.



(a) Début du test



(b) En cours de test

Figure 3.13: Interface du test 4

Les objectifs du test 4 sont :

- de confirmer les résultats du test 2 pour BA et MF, à savoir que de petits changements d'embouchure génèrent des différences de brillance, et de tester cela pour les Simus ;
- de vérifier la corrélation entre l'évaluation subjective de la brillance d'une part, et la profondeur de l'embouchure d'autre part ;
- de contrôler si cette corrélation est ou non indépendante de la catégorie des sons.

Les données et les résultats expérimentaux sont présentés dans le chapitre suivant.

### 3.4.5.2 Résultats du test 4

Le classement de chaque sujet a fourni un rang pour chaque son sur une échelle de brillance. Avant d'agréger les évaluations des sujets dans une réponse moyenne, nous avons d'abord vérifié si le groupe de sujets était homogène, et ensuite sélectionné un groupe dont les évaluations étaient consensuelles.

Pour estimer le degré de l'accord entre les sujets, nous avons calculé le coefficient de Spearman. Le coefficient de Spearman inter-sujet est une mesure de l'accord du classement de deux sujets. Il est donné par la relation 3.3.

$$r_{ab} = 1 - \frac{6 \cdot \sum_{i=1}^n (C_a(T_i) - C_b(T_i))^2}{n \cdot (n^2 - 1)} \quad (3.3)$$

avec  $n$  le nombre de sons (ici, 11),  $C_a$  et  $C_b$  les rangs du son  $T_i$  proposés par les sujets  $a$  et  $b$ . Ce coefficient est égal à 1 si les rangs sont exactement identiques, -1 s'ils sont exactement opposés. La matrice des coefficients de Spearman entre les sujets est ensuite transformée en matrice des distances (distance =  $1 - r_{ab}$ ). Cette distance vaut donc 0 si les classements sont les mêmes et 2 s'ils sont strictement opposés. Plus la distance est grande, plus les sons sont différents. Cette matrice est représentée sous forme d'arbre par une classification hiérarchique ascendante pour chaque catégorie de sons. Le principe de cette méthode est d'agglomérer progressivement les éléments deux à deux. Les deux éléments les plus proches sont regroupés en un nouvel élément pour lequel la distance aux autres éléments est calculée selon la règle d'agrégation choisie. Cette étape est renouvelée jusqu'à la formation d'un unique groupe. Ces regroupements peuvent être représentés sous forme d'arbre. La règle d'agrégation choisie ici est celle du barycentre [URD 01]. Pour confirmer la concordance des tendances des réponses des sujets, une analyse en composantes principales normée a été réalisée sur la matrice des rangs des sons donnés par chacun des sujets (Tableau 3.14), et le plan factoriel dans lequel sont projetés les individus est présenté en partie inférieure des illustrations 3.14, 3.15 et 3.16.

Instr.	S1	S2	...	Sn
T0	11	8	...	10
T1	10	10	...	11
T2	9	11	...	8
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
T10	1	2	...	1

Tableau 3.14: Structure du tableau de données de l'ACP normée sur les classement en brillance des sons pour les  $n$  sujets

Le nombre de sujets ayant participé au test 4 est présenté par catégorie dans le tableau



3.15.

Catégorie	Nb sujets
BA	18
MF	15
Simu	17

Tableau 3.15: Nombres de sujets ayant participé au test 4 par catégorie de sons

Pour la catégorie BA, trois sujets se distinguent nettement : les sujets 9, 10 et 12. Ces sujets ont un comportement que l'on qualifie d'atypique par rapport au reste du groupe. Nous avons donc décidé de ne pas conserver leur jugement pour l'analyse des résultats. Le reste du groupe semble être homogène et est donc conservé pour la suite.

Pour la catégorie MF (Figure 3.15), les réponses sont très disparates. Trois groupes se distinguent :

- le sujet 7 n'est visiblement en accord avec aucun autre sujet;
- le deuxième groupe est constitué des sujets 1, 5, 8, 10, 11 et 13 ;
- le troisième est constitué des sujets 2, 3, 4, 6, 9, 12, 14 et 15.

Le plan factoriel montre un bon accord entre les sujets du troisième groupe. Nous gardons donc ce groupe de 8 sujets.

Pour la catégorie Simu (Figure 3.16), avec 87% de variance sur le premier axe du plan factoriel, nous avons décidé de conserver les évaluations de tous les sujets.

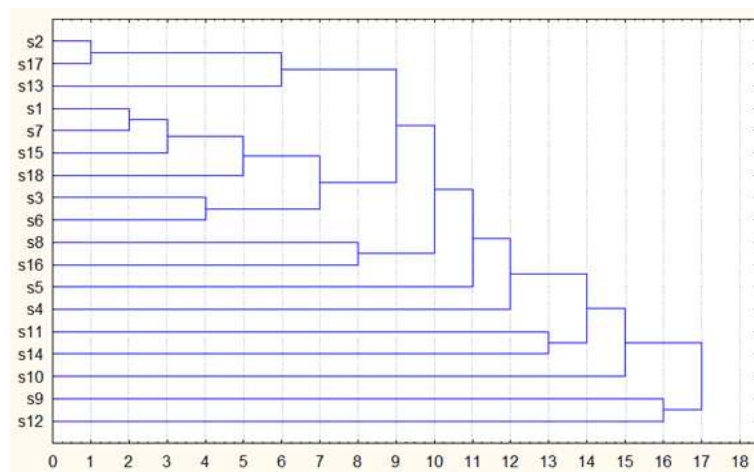
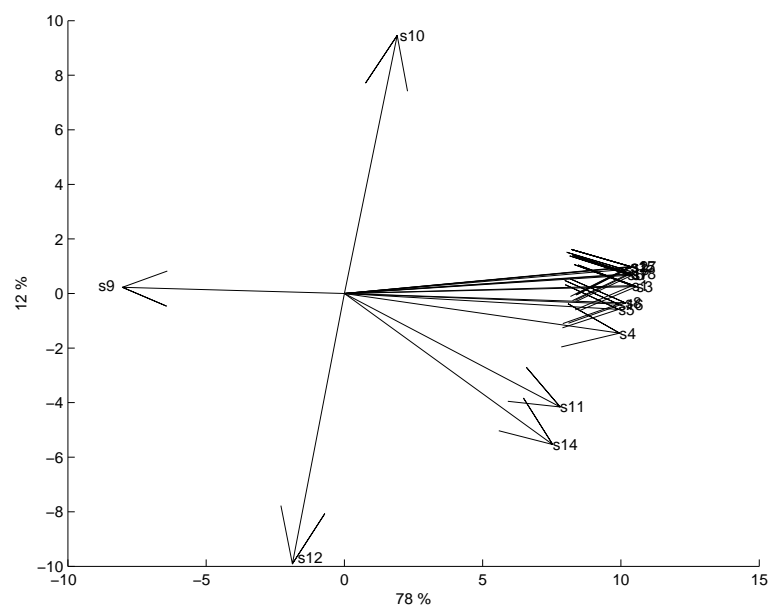
(a) *Dendrogramme*(b) *Plan factoriel*

Figure 3.14: Vérification de l'homogénéité du panel pour la catégorie BA

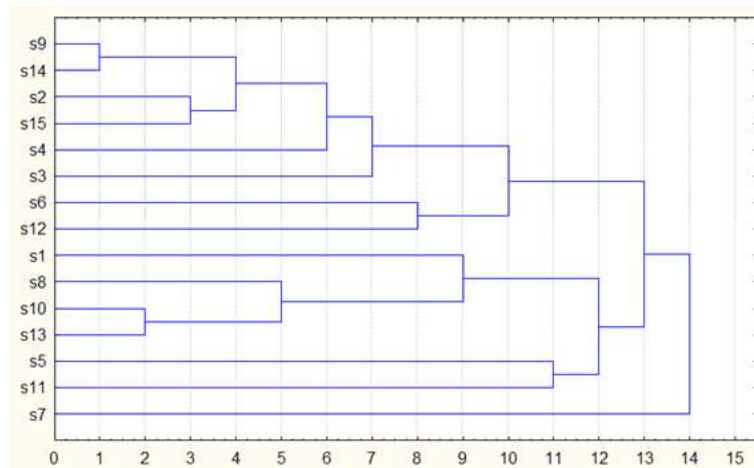
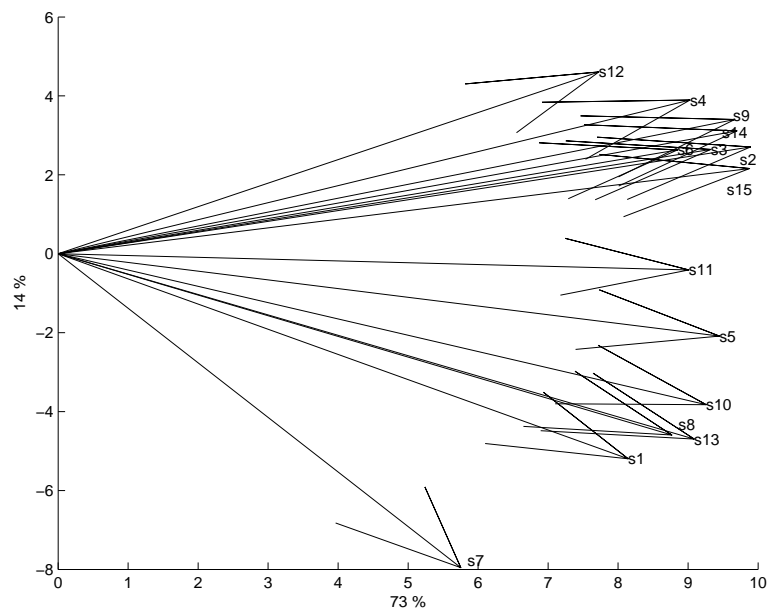
(a) *Dendrogramme*(b) *Plan factoriel*

Figure 3.15: Vérification de l'homogénéité du panel pour la catégorie MF

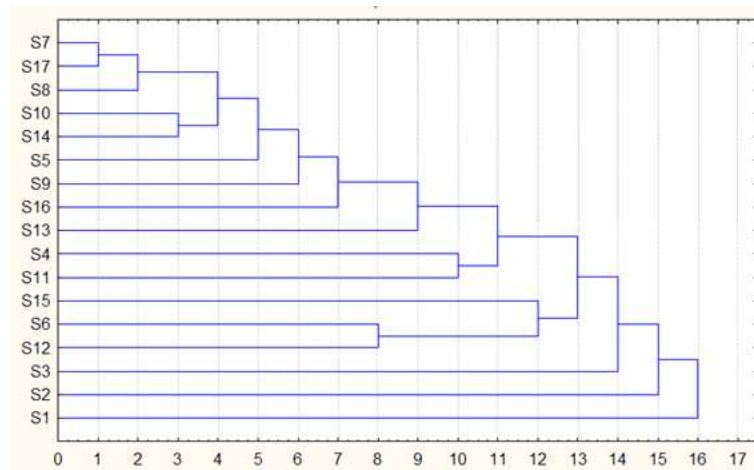
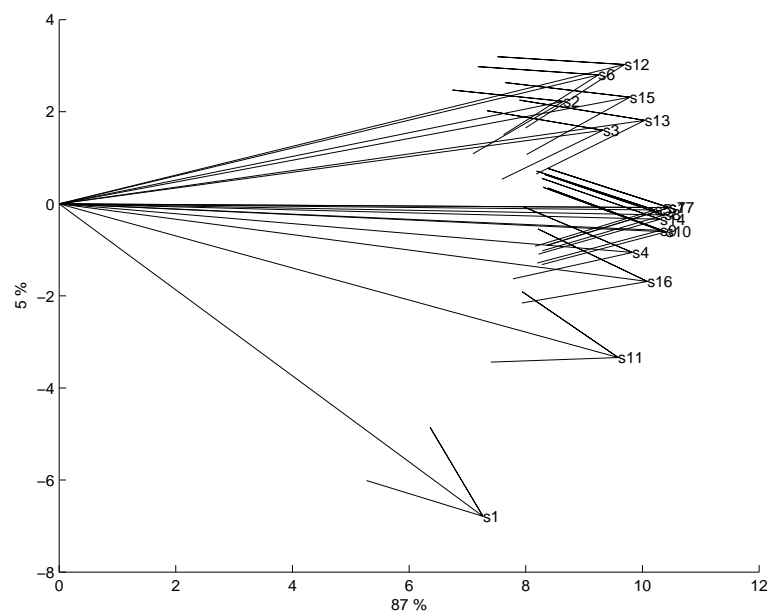
(a) *Dendrogramme*(b) *Plan factoriel*

Figure 3.16: Vérification de l'homogénéité du panel pour la catégorie Simu

Afin d'exhiber une tendance spécifique du panel de sujets dans l'évaluation de la brillance, nous avons enlevé les données des sujets atypiques et nous avons considéré seulement les données du panel retenu pour obtenir une réponse moyenne. Le tableau 3.16 présente pour chaque instrument et chaque catégorie de sons le score moyen en brillance, qui est la moyenne des rangs attribués à chaque instrument.

Position	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
BA	10.93	10.07	9.00	6.60	5.87	7.67	4.47	3.07	3.20	3.33	1.60
MF	10.13	8.13	9.75	7.13	9.00	6.38	3.25	2.25	1.25	4.00	4.63
Simu	10.76	9.76	9.18	7.65	6.59	6.06	4.82	4.00	3.12	2.29	1.76

Tableau 3.16: Score en brillance des 11 instruments

La première étape de l'analyse des scores de brillance est de calculer la corrélation entre les 3 catégories. Le coefficient de Pearson est donc calculé et les résultats sont présentés dans le tableau 3.17.

$R_{Pearson}(BA, MF)$	$R_{Pearson}(BA, Simu)$	$R_{Pearson}(MF, Simu)$
0.83	0.97	0.84

Tableau 3.17: Coefficient de corrélation de Pearson entre les scores de brillance des 3 catégories de sons

Les comportements des trois catégories sont donc très proches, surtout BA et Simu. Intéressons-nous maintenant à la corrélation entre la brillance et la profondeur d'embouchure. Les résultats des corrélations sont donnés en tableau 3.18.

$R_{Pearson}(BA)$	$R_{Pearson}(MF)$	$R_{Pearson}(Simu)$
-0.96	-0.83	-0.99

Tableau 3.18: Coefficient de Pearson entre les notes de brillance et la profondeur de l'embouchure pour les 3 catégories de sons

Les coefficients sont négatifs puisque la brillance est inversement corrélée à la profondeur : plus l'embouchure est profonde, moins le son est perçu comme brillant en général. Pour les catégories BA et Simu, les scores en brillance sont fortement corrélés avec la profondeur d'embouchure. L'ordre est même parfaitement respecté pour les sons de simu. Pour les sons joués par le musicien, cette corrélation est moins évidente. Ceci pourrait être expliqué par le fait que le musicien compense les changements d'embouchure et adapte son masque à l'instrument afin de produire le son qu'il souhaite. Une deuxième explication serait que certaines différences entre instruments ne sont pas perçues quand ils sont joués par un musicien. Pour savoir si les instruments sont distingués les uns des autres, nous utilisons la statistique de Friedman.

### a - Test de Friedman global

L'objectif de la statistique de Friedman global est de savoir si les produits sont différenciés. Il est utilisé dans le cas d'un plan en blocs complets, c'est-à-dire que tous les sujets ordonnent tous les échantillons de l'étude, ce qui est notre cas. Le test statistique de Friedman global [DEP 98] compare les moyennes des rangs attribués par les sujets à une valeur des rangs moyenne qu'auraient obtenu les produits s'ils avaient été classés ex-aequo. Cette valeur moyenne est calculée par la formule 3.4.

$$R_{moy} = \frac{n(p+1)}{2} \quad (3.4)$$

avec  $p$  le nombre de produits et  $n$  le nombre de sujets.

L'équation qui permet de calculer la statistique de Friedman globale est l'équation 3.5.

$$F = \frac{12}{n \cdot p(p+1)} \sum_{i=1}^p (R_i - R_{moy})^2 \quad (3.5)$$

avec  $R_i$  la somme des rangs affectés au produit  $i$ .

Le calcul de la statistique de Friedman globale donne les résultats du tableau 3.19. La valeur seuil est lue dans la table du  $\chi^2$  pour 10 degré de liberté (nombre de produits -1) à un seuil de 1/1000. Elle est égale à  $F_{seuil} = 29.59$ .

	F de Friedman	$\sigma$
BA	134	59.7
MF	70	39.9
Simu	147	58.3

Tableau 3.19: Valeur du F de Friedman et de la plus petite différence significative  $\sigma$  pour les moyennes des scores

Les valeurs de  $\sigma$  seront exploitées dans la deuxième partie du test. Puisque  $F_{simu} > F_{BA} > F_{MF} > F_{seuil}$ , le test de Friedman global est significatif, la conclusion est donc qu'il existe des différences significatives entre les échantillons sur l'axe de brillance pour un seuil de 1/1000, et ce pour les 3 familles de sons. Notons cependant que les statistiques de Friedman sont nettement plus élevées pour les catégories BA et simu que pour MF. Pour préciser ces différences perçues, nous pratiquons le test de Friedman paire par paire.

### b - Test de Friedman par paires

Lorsque le test global donne des résultats positifs comme dans notre cas, afin de préciser les résultats, une comparaison multiple des sommes des rangs peut être menée. Les effectifs étant les mêmes pour chaque échantillon, la plus petite différence significative  $\sigma$  doit être calculée suivant la formule 3.6.

$$\sigma = z \sqrt{\frac{n \cdot p(p+1)}{6}} \quad (3.6)$$

où  $z$  est la valeur lue dans la table gaussienne au niveau  $\frac{2\alpha}{p(p-1)}$ .

Pour savoir si deux produits  $i$  et  $j$  sont perçus comme significativement différents, l'écart entre les moyennes  $R_i$  et  $R_j$  est comparé à la valeur  $\sigma$ . Si l'écart est supérieur à  $\sigma$ , les produits sont significativement différents.

Dans notre cas, le risque  $\alpha$  est choisi à 5%. La valeur de  $z$  est lue dans la table gaussienne pour  $p=11$ . Elle vaut 3,3. Les valeurs de  $\sigma$  sont donc calculées et sont indiquées dans le tableau 3.19.

Ces valeurs de  $\sigma$  sont ensuite comparées aux différences de somme des rangs pour les sujets retenus. Les résultats sont indiqués dans les tableaux 3.20, 3.21 et 3.22. Une croix indique que les deux sons de la paire sont différenciés par les auditeurs, au seuil de 5%.

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
T0				x	x		x	x	x	x	x
T1					x		x	x	x	x	x
T2							x	x	x	x	x
T3											x
T4											x
T5								x	x	x	x
T6											
T7											
T8											
T9											
T10											

Tableau 3.20: Résultats du test de Friedman paire par paire pour la catégorie BA

Pour chaque paire de sons, le test de Friedman prouve que quelques paires sont sensiblement perçues comme différentes avec une  $p$ -valeur inférieure à 5%. Ces paires, indiquées par une croix dans les tableaux 3.20, 3.21, et 3.22 sont plus nombreuses pour les sons issus de BA et simu (24 paires pour BA et 27 paires pour Simu) que pour les sons produits par le musicien (18 paires pour MF). Pour les autres paires (par exemple T0-T2), la différence de brillance perçue est trop petite pour être statistiquement significative.

Il est à noter que la brillance perçue pour les sons simulés est fortement corrélée à la brillance perçue pour des sons réels produits par la bouche artificielle. Les simulations génèrent donc des différences de brillance en accord avec celles générées par la bouche artificielle. C'est un point essentiel pour la validation des simulations.

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
T0							x	x	x	x	x
T1								x	x		
T2							x	x	x	x	x
T3									x		
T4							x	x	x	x	
T5									x		
T6											
T7											
T8											
T9											
T10											

Tableau 3.21: Résultats du test de Friedman paire par paire pour la catégorie MF

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
T0					x	x	x	x	x	x	x
T1						x	x	x	x	x	x
T2							x	x	x	x	x
T3								x	x	x	x
T4									x	x	x
T5										x	x
T6											
T7											
T8											
T9											
T10											

Tableau 3.22: Résultats du test de Friedman paire par paire pour la catégorie Simu



Pour la catégorie MF, la relation entre la brillance et la profondeur d'embouchure est moins évidente. La variabilité créée par le musicien semble être du même ordre que les subtilités de timbre que nous tentons d'expliquer. Pour cette raison, afin d'interpréter les différences de brillance avec des variables objectives, nous nous concentrerons pour le reste de notre travail sur des sons produits par la bouche artificielle.

## 3.5 Etude objective

Ce chapitre présente les variables objectives que nous essayons de corrélérer aux données issues des tests subjectifs. Certains de ces paramètres sont tirés du signal lui-même, ou bien calculés ou mesurés à partir de l'impédance d'entrée de l'instrument.

### 3.5.1 Paramètres issus de la courbe d'impédance

Les fréquences de résonance  $f_{res}$  ont été extraites à partir des courbes d'impédance mesurées pour T0 et calculées pour les autres positions. L'étude subjective étant concentrée sur une note en particulier (*Sib3*), soit le 4<sup>e</sup> partiel en doigté à vide, nous nous sommes intéressés aux fréquences de résonance  $f_{res4}$  et  $f_{res8}$ , relevées sur la courbe d'impédance. Pour ces fréquences, nous avons relevé leur amplitude notée  $|Z_4|$  et  $|Z_8|$  et leur facteur de qualité  $Q_4$  et  $Q_8$ . Les données sont présentées dans le tableau 3.23. L'inharmonicité ( $f_{res8}/2.f_{res4}$ ) est également renseignée dans ce tableau.

	4 <sup>e</sup> résonance			8 <sup>e</sup> résonance			Inharmonicité $f_{res8}/2.f_{res4}$
	$f_{res4}(Hz)$	$Q_4$	$ Z_4 $ (dB)	$f_{res8}(Hz)$	$Q_8$	$ Z_8 $ (dB)	
T0	465.2	41.7	36.9	912.9	46.3	35.2	0.9812
T1	463.5	40	37.2	909.2	46.2	33.5	0.9808
T2	461.7	39.9	37.4	906.4	47.8	31.9	0.9816
T3	459.9	39.5	37.7	904	46.2	30.4	0.9828
T4	458	39	37.8	902.1	45.5	29	0.9848
T5	456	37.6	38	900.6	46.9	27.7	0.9875
T6	454.1	38.8	38.1	899.3	47.8	26.6	0.9902
T7	452.1	37.2	38.2	898.2	47.2	25.5	0.9934
T8	450	36.7	38.3	897.2	45.1	24.5	0.9969
T9	448	36.9	38.3	896.3	45.4	23.6	1.0003
T10	446	35.9	38.2	895.6	46.5	22.8	1.004

Tableau 3.23: Fréquences de résonance, facteur de qualité, amplitude des pics et inharmonicité pour chacun des 11 instruments

### 3.5.2 Paramètre issu du signal

Le centre de gravité spectral (CGS) est souvent associé au caractère brillant d'un son [GRE 78], c'est pourquoi nous l'avons sélectionné. Le CGS est calculé dans notre cas sur les 6 premières harmoniques (cf Chap.1). Le tableau 3.24 donne les valeurs pour chaque famille de sons et chaque instrument.

CGS	Instruments										
	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
BA	2.72	2.74	2.65	2.37	2.46	2.32	2.38	2.14	2.18	2.16	2.16
MF	2.53	2.50	2.71	2.55	2.54	2.52	2.66	2.61	2.65	2.77	2.82
Simu	2.62	2.57	2.54	2.51	2.48	2.45	2.42	2.39	2.36	2.34	2.32

Tableau 3.24: CGS pour les trois familles BA, MF et Simu pour chaque instrument

Pour bien visualiser l'évolution du CGS pour chaque catégorie, les valeurs du tableau 3.24 sont représentées sous forme de graphe Figure 3.17.

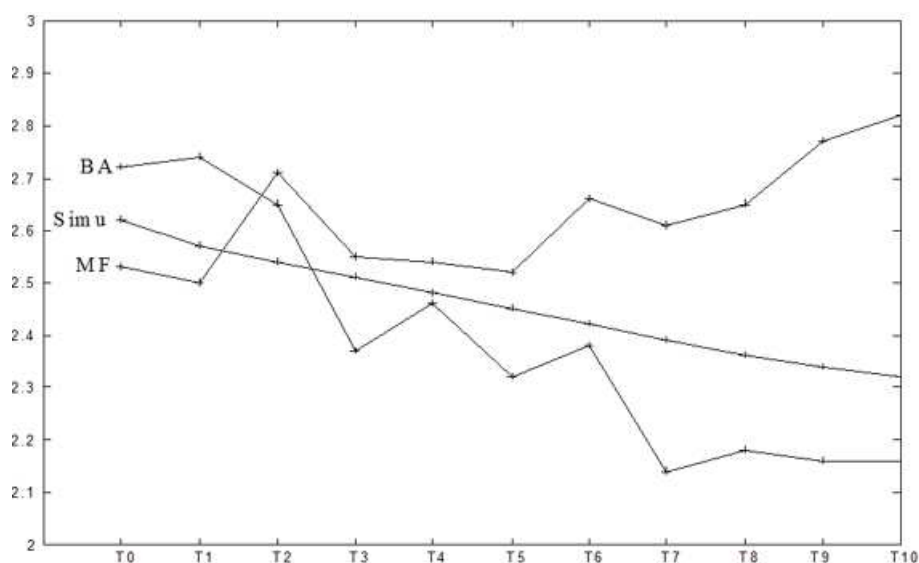


Figure 3.17: Valeurs du CGS pour chaque instrument selon les 3 catégories BA, MF et Simu

Pour les catégories BA et Simu, nous notons cette tendance que plus l'embouchure est profonde, plus le CGS est petit. Ce comportement ne se retrouve pas pour la catégorie MF. Ceci peut être expliqué par le fait que le musicien n'est pas assez reproductible (son masque change en fonction de l'instrument joué). Le musicien produit des variations du timbre du même ordre que celles qui sont créées en faisant varier l'embouchure, et perturbe l'effet de l'embouchure sur le contenu spectral des sons.

## 3.6 Corrélations et interprétation des résultats

Dans ce chapitre, nous tentons de relier les attributs subjectifs de brillance avec les paramètres objectifs sélectionnés. Dans un premier temps, nous évaluons la corrélation entre la brillance et le centre de gravité spectral. Puis, nous relierons la brillance à des paramètres issus de la courbe d'impédance.

### 3.6.1 Corrélation Brillance - CGS

Pour quantifier la corrélation entre les scores de brillance (Tableau 3.16) et les valeurs du CGS (Tableau 3.24), le coefficient de Pearson est calculé pour tous les échantillons. Un coefficient proche de 1 ( ou de -1) signifie que les 2 variables sont fortement corrélées (ou inversement corrélées). Dans notre cas, nous cherchons à savoir si les scores de brillance sont corrélés aux valeurs du CGS. Le coefficient de Pearson est donc calculé pour ces deux listes de valeurs. Les résultats sont donnés dans le tableau 3.25.

	BA	MF	Simu
$R_{Pearson}$	0.929	-0.43	0.997

Tableau 3.25: Valeur du coefficient de Pearson entre les scores de brillance et le CGS pour chaque famille de sons

Pour les catégories BA et Simu, les résultats sont en accord avec une notion bien connue en psychoacoustique : la brillance des sons est fortement corrélée à leur centre de gravité spectral [KRI 94]. Pour les sons produits par le musicien, il n'y a étonnement pas de bonne corrélation entre ces deux variables. Si la même corrélation est calculée avec cette fois l'autre partie du groupe de sujets (s1, s5, s7, s8, s10, s11 et s13), le coefficient devient ( $r_{pearson}=0.25$ ). La corrélation est cette fois dans le sens attendu (coefficient positif), mais trop faible pour en tirer des conclusions fiables. La tendance étant moins marquée et le nombre de sujets retenus (8) n'étant pas forcément représentatif de la population, la note moyenne en brillance attribuée aux sons peut manquer de fiabilité et n'être sans doute pas assez représentative d'une tendance. Cette corrélation CGS/musicien est mauvaise et cela peut être dû au fait que lorsqu'il joue, le musicien "cache" les indices qui permettent au testeur de détecter les différences de brillance. Cela entraînerait une difficulté plus importante pour l'épreuve de classement des sons de musiciens par rapport aux autres catégories, les mêmes sujets ayant pour la plupart réalisé les 3 épreuves. Pourtant, les différences de CGS sont du même ordre. Le CGS ne permettrait donc pas à lui seul de différencier les instruments sur un axe de brillance. La deuxième explication serait que les différences étaient beaucoup plus fines avec les sons MF, et que le sujet a donc eu du mal à avoir un jugement fiable. Un entraînement des sujets semble nécessaire. Nous arrivons alors à une limite des épreuves avec des sujets naïfs.

### 3.6.2 Corrélation Brillance - paramètres de la courbe d'impédance

L'étude du fonctionnement des instruments de musique de type cuivre montre le couplage entre les lèvres du musicien et le résonateur (instrument). La fréquence de jeu, liée à la hauteur du son produit par l'instrument, est non seulement commandée par la plus proche fréquence de résonance de l'impédance d'entrée mais aussi probablement conditionnée par des fréquences de résonance du résonateur de rang supérieur [BEN 76].

Pour étudier la brillance de la note Sib3, nous faisons l'hypothèse que le spectre de la note en régime permanent, donc en particulier son centre de gravité spectral est principalement régi par les caractéristiques de la courbe d'impédance correspondant aux résonances n°4 et n°8 (le 8<sup>e</sup> pic de résonance correspond au deuxième harmonique de la note Sib3). Notre objectif est de trouver le centre de gravité spectral des sons, puis, dans un second temps, d'identifier les caractéristiques de la courbe d'impédance influençant le plus la brillance (la relation entre la brillance et l'amplitude des composantes "haute fréquence" du son est clairement démontrée). Ainsi, afin d'étudier la brillance de la note Sib3, nous proposons premièrement d'étudier l'influence des paramètres d'impédance de l'instrument sur le centre de gravité spectral. Deuxièmement, nous limitons notre analyse à l'influence de la seconde résonance de l'impédance sur le CGS. Pour finir, nous proposons d'expliquer l'influence de la courbe d'impédance sur l'importance du 2<sup>n</sup>d harmonique de la note.

Nous avons considéré les variables de la courbe d'impédance suivantes : l'inharmonicité  $f_{res8}/2f_{res4}$ ,  $|Z_8|/|Z_4|$ ,  $Q_8/Q_4$ .

La figure 3.18 représente une superposition des caractéristiques de la courbe d'impédance autour des résonances n°4 et n°8, et du fondamental f et du 2<sup>n</sup>d harmonique 2f de la note Bb3.

- La ligne continue représente la courbe d'impédance autour de la résonance n°4 et n°8. Ces résonances sont caractérisées par  $f_{res4}$ ,  $f_{res8}$ ,  $|Z_4|$ ,  $|Z_8|$ ,  $Q_4$ ,  $Q_8$  ;
- La ligne en pointillé sur le schéma du haut représente une courbe d'impédance modifiée autour de la résonance n°8 quand  $|Z_8|$  augmente ;
- la ligne en pointillé sur le schéma inférieur représente une courbe d'impédance modifiée autour de la résonance n°8 quand  $Q_8$  augmente.

Nous supposons que la fréquence de jeu de la note (f) est proche de la fréquence de résonance  $f_{res4}$ , et nous limitons notre étude au cas où l'inharmonicité  $f_{res8}/2f_{res4}$  est inférieure à 1 (figure 3.18). Nous supposons tout d'abord pour cette analyse que la fréquence de jeu f est plus grande que  $f_{res4}$  et que le deuxième harmonique 2f est plus grand que  $f_{res8}$  (cas de la figure 3.18). Les autres cas seront analysés par la suite.

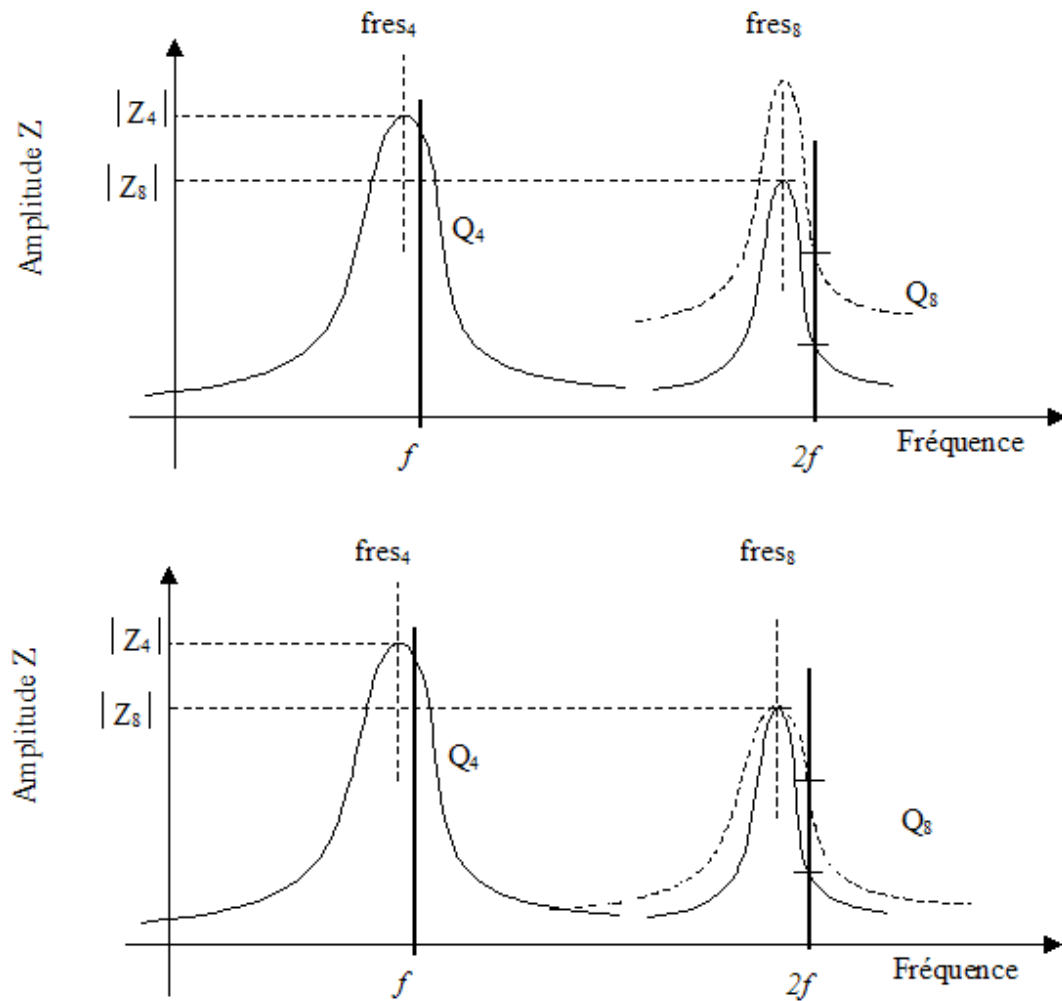


Figure 3.18: Cas n°1 : représentation de la courbe d'impédance autour des résonances n°4 et n°8 et des fréquences de jeu  $f$  et leur premier harmonique  $2f$  (unité arbitraire)

Pour étudier l'influence des paramètres de l'impédance sur le CGS, nous considérons  $f$ ,  $2f$  et  $f_{res4}$  fixés et nous étudions l'influence de la variation des paramètres de  $f_{res8}$ . Cette analyse simplifiée de la physique du système couplé lèvre-résonateur, basée sur la courbe d'impédance d'entrée donnée sur la figure 3.18, indique les conclusions suivantes :

- l'amplitude du deuxième harmonique de Sib3 (fréquence =  $2f$ ) est favorisée si  $f_{res8}$  se rapproche de  $2f$  donc si l'inharmonicité  $f_{res8}/2f_{res4}$  tend vers 1, tous les autres paramètres de la courbe d'impédance restant constants. Ainsi, le CGS d'un son devrait augmenter si  $f_{res8}/2f_{res4}$  tend vers 1 ;
- l'amplitude du deuxième harmonique de Sib3 est favorisée si la valeur de  $Z_8$  augmente (Figure 3.18 en haut), tous les autres paramètres de la courbe d'impédance restant constants. Ainsi, le CGS devrait augmenter si  $|Z_8|/|Z_4|$  augmente ;
- l'amplitude du deuxième harmonique de Sib3 est favorisé si le facteur de qualité  $Q_8$  diminue (Figure 3.18 en bas), tous autres paramètres de la courbe d'impédance restant constants. Ainsi, le CGS d'un son devrait augmenter quand  $Q_8/Q_4$  diminue.

Ces conclusions restent vraies si la fréquence de jeu  $f$  est inférieure à  $f_{res4}$  et le deuxième harmonique  $2f$  est plus grand que  $f_{res8}$  (Figure 3.19). L'amplitude du  $2^{\text{nd}}$  harmonique  $2f$  augmente quand  $f_{res8}$  se déplace vers  $2f$  donc quand l'inharmonicité tend vers 1, ou bien quand  $|Z_8|$  augmente ou bien encore quand  $Q_8$  augmente.

Si la fréquence de jeu  $f$  est inférieure à  $f_{res4}$  et que la fréquence  $2f$  est inférieure à  $f_{res8}$  (Figure 3.20), l'amplitude de  $2f$  augmente quand  $|Z_8|$  augmente ou bien quand  $Q_8$  augmente. La particularité dans ce cas est que l'inharmonicité doit diminuer pour que l'amplitude du  $2^{\text{nd}}$  harmonique  $2f$  augmente. Les conclusions sont donc semblables, à part l'inharmonicité qui diminue.

Le dernier cas serait celui où  $f$  serait supérieur à  $f_{res4}$  et  $2f$  inférieur à  $f_{res8}$  mais, cela signifierait une inharmonicité supérieure à 1 ce qui ne fait pas partie de notre domaine d'étude.

Le tableau 3.26 résume les 3 cas étudiés.

Cas	Condition 1	Condition 2	$ Z_8 $	$Q_8$	$f_{res8}/2f_{res4}$
n°1	$f > f_{res4}$	$2f > f_{res8}$	+	-	+
n°2	$f < f_{res4}$	$2f > f_{res8}$	+	-	+
n°3	$f < f_{res4}$	$2f < f_{res8}$	+	-	-

Tableau 3.26: Sens de variation des variables de la courbe d'impédance selon le cas d'étude, pour favoriser l'amplitude du deuxième harmonique

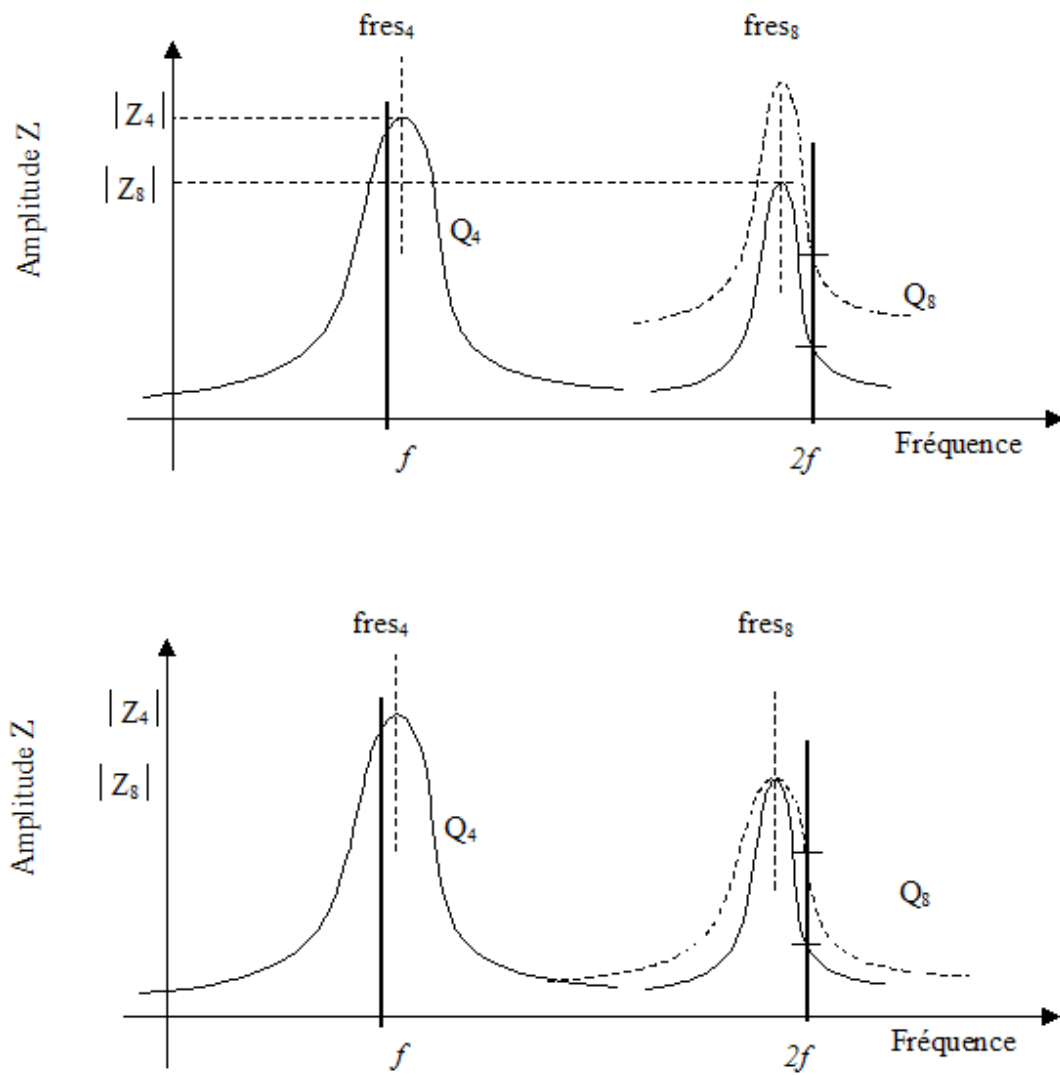


Figure 3.19: Cas n°2 : représentation de la courbe d'impédance autour des résonances n°4 et n°8 et de  $f$ ,  $2f$  avec  $f$  inférieure à  $f_{res4}$  et  $2f$  supérieure à  $f_{res8}$

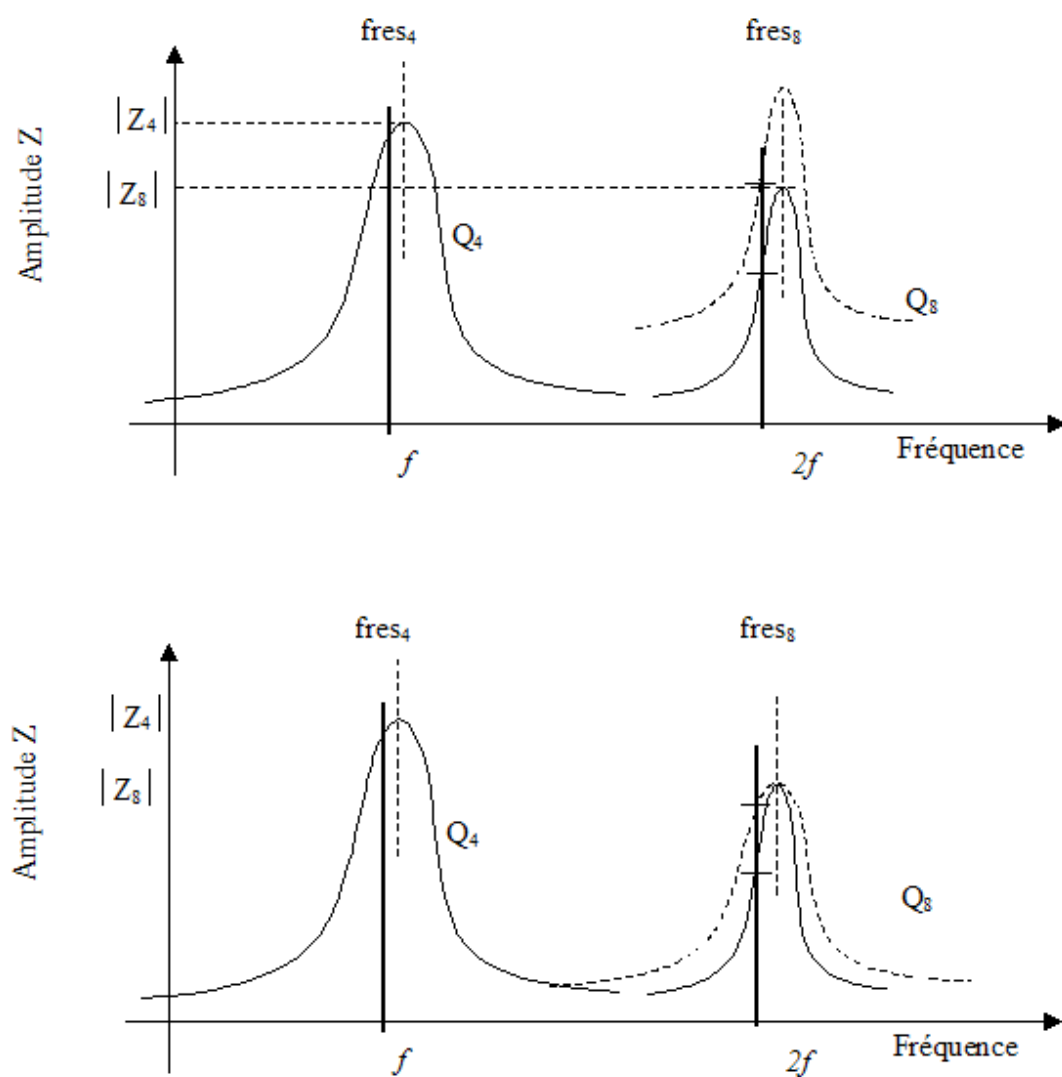


Figure 3.20: Cas n°3 : représentation de la courbe d'impédance autour des résonances n°4 et n°8 et de  $f$ ,  $2f$  avec  $f$  inférieur à  $f_{res4}$  et  $2f$  inférieur à  $f_{res8}$



Naturellement, les choses ne sont pas aussi simples quand nous voulons interpréter les scores de brillance par des caractéristiques de l'impédance de notre ensemble d'instruments : toutes les caractéristiques changent en même temps et leur influence est combinée. Néanmoins, nous avons calculé le coefficient de corrélation linéaire (Pearson) (tableau 3.27) entre les notes de brillance et  $Z_8/Z_4$  d'une part, et  $Q_8/Q_4$  d'autre part. Les résultats confirment les conclusions suggérées par l'étude physique précédente : ( $R_{Pearson}(Z_8/Z_4) > 0$  et  $R_{Pearson}(Q_8/Q_4) < 0$ ). La corrélation entre la brillance et l'inharmonicité  $f_{res8}/2f_{res4}$  est dans notre cas négative et confirme donc les conclusions de l'étude physique précédente.

	BA	MF	Simu
$R_{Pearson}(Z_8/Z_4)$	0.96	0.84	0.99
$R_{Pearson}(Q_8/Q_4)$	-0.81	-0.74	-0.85
$R_{Pearson}(f_{res8}/2f_{res4})$	-0.90	-0.78	-0.96

Tableau 3.27: Valeur du coefficient de Pearson entre les scores de brillance et les données de la courbe d'impédance

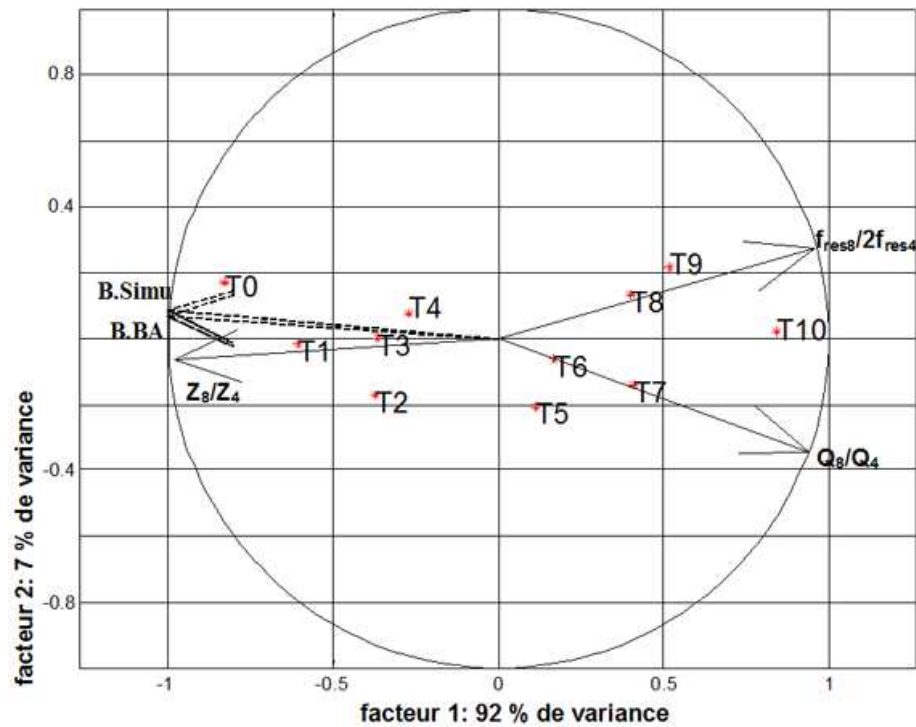
Afin de déterminer les variables les plus influentes parmi les 3 variables  $Z_8/Z_4$ ,  $Q_8/Q_4$ ,  $f_{res8}/2f_{res4}$ , nous avons réalisé une analyse en composante principale sur les données normalisées (matrice de corrélation) de 11 produits par 3 variables issues du tableau 3.23. La première composante contient 92% d'inertie c'est-à-dire que le premier axe du plan factoriel représente 92% de l'information contenue dans le tableau des variables. La deuxième composante représente quant à elle 7% de variance. Un plan, donc en 2 dimensions, suffit à représenter 99% de l'information. La figure 3.21 représente la position des individus (T0 à T10) dans le plan factoriel, les variables étant représentées par des vecteurs.

L'évolution des variables est complexe et elle est combinée. Il est à noter que quand  $f_{res8}/2f_{res4}$  augmente,  $Q_8/Q_4$  augmente et  $Z_8/Z_4$  diminue.

Afin d'interpréter les notes en brillance, nous avons réalisé une régression linéaire multiple des scores  $Bi$  de brillance (variable dépendante) sur les coordonnées factorielles  $F1_i$  et  $F2_i$  (variables indépendantes). Cette technique classique en analyse sensorielle mène à la détermination des coefficients ( $\alpha$  et  $\beta$ ) de la régression, donnés par l'équation 3.7.

$$Bi = \alpha F1_i + \beta F2_i + \epsilon \quad (3.7)$$

Pour chaque catégorie, les coefficients  $R^2$  de détermination des régressions sont donnés dans le tableau 3.28.

Figure 3.21: Plan factoriel  $Z_8/Z_4 - Q_8/Q_4 - f_{res8}/2f_{res4}$ 

	BA	MF	Simu
$R^2$	0.89	0.37	0.98

Tableau 3.28: Coefficient de détermination de la regression linéaire multiple entre les scores de brillance et les scores factoriels

L'ajustement est très bon pour les catégories BA et Simu (significatifs avec p-valeur  $< 1\%$ ). Pour le MF, seulement 37% de l'information est prise en considération par la régression. Cela vient sans doute du fait que les scores de brillance pour cette catégorie de sons sont moins fiables.

Pour les catégories BA et Simu, une interprétation graphique de la régression peut être donnée en projetant dans le plan factoriel l'attribut "brillance", B.BA et B.Simu (figure 3.21). L'origine du vecteur est placée arbitrairement à l'origine du plan. Les valeurs des coefficients de régression  $\alpha$  et  $\beta$ , donnent la position de la flèche. La flèche est orientée dans le sens de brillance croissante. Les flèches de brillance B.BA et B.Simu ont quasiment fusionné ce qui prouve que la brillance des sons simulés est interprétée de la même manière que celle de la brillance des sons joués par la bouche artificielle. C'est encore un point essentiel pour la validation des simulations.

En ce qui concerne les relations entre la brillance et les caractéristiques de la courbe d'impédance, nous avons noté que plus  $|Z_8|/|Z_4|$  est grand, et plus le rapport  $Q_8/Q_4$  diminue, plus le son est perçu comme brillant. Ce résultat est conforme à l'intuition du physicien. Mais nous remarquons également que plus le rapport d'inharmonicité  $f_{res8}/2f_{res4}$  est petit, plus le son est perçu comme brillant. Ce résultat semble conforter l'étude physique réalisée auparavant en se situant dans le cas n°3, pour  $f < f_{res4}$  et  $2f < f_{res8}$ .

### 3.7 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons étudié la brillance des sons de trompette, les sons étant produits de trois manières :

- par un musicien ;
- par une bouche artificielle ;
- par des simulations par modèle physique.

Deux études ont été menées sur un ensemble d'instruments généré en utilisant une embouchure à profondeur variable : une étude subjective basée sur des test d'écoute, visant à déterminer un seuil de différentiation des sons et une évaluation de la justesse ; une étude objective, avec l'extraction de variables objectives de la courbe d'impédance.

Nous avons mis en évidence que la bouche artificielle et les simulations suivent la même tendance que le musicien quant à la perception des différences de timbre. Nous avons vérifié que les seuils de différentiation des sons sont du même ordre pour la bouche artificielle, pour les sons simulés et pour le musicien. Nous avons démontré que la bouche artificielle et les simulations donnent des résultats semblables concernant l'évaluation de la brillance des sons. Nous avons mis en évidence le fait que le musicien n'est pas assez reproductible et crée lui-même des différences de timbre du même ordre que la différence produite par les variations de profondeur d'embouchure. Une de nos conclusions est que

la bouche artificielle est un dispositif fiable pour l'étude de la qualité des trompettes, pour la conception de nouveaux instruments, et pour la validation d'outils de conception basés sur les simulations.

En ce qui concerne l'interprétation des scores de brillance, nous avons proposé une méthode basée sur l'analyse en composante principale et la régression multiple pour la recherche des caractéristiques fondamentales de la courbe d'impédance les plus influentes sur la brillance. Nous avons constaté que l'amplitude du pic d'impédance correspondant au second harmonique est très corrélée à la brillance. Gardons cependant à l'esprit que s'il existe une corrélation entre ces deux variables, cela n'implique pas un lien de causalité. Les simulations sont un bon outil pour étudier expérimentalement l'influence des variables de la courbe d'impédance sur des attributs du son. En permettant de tester un très grand éventail d'instruments virtuels, les études statistiques qui demandent de nombreuses données seront rendues possible pour examiner des liens de causalité entre données subjectives et données objectives des instruments de musique. Ces liens de causalité peuvent ensuite être utilisés pour la conception d'instruments nouveaux.

En ce qui concerne les simulations, nous avons montré que les sons produits en utilisant la technique de l'équilibrage harmonique détaillée dans le chapitre 1 permettent de mettre en avant des différences fines de timbre qui sont perçues de la même manière que celles des sons joués par la bouche artificielle ou le musicien. C'est une première étape pour l'utilisation des techniques d'acoustique virtuelle dans la conception de nouveaux instruments. La suite de l'étude consistera à prendre en compte les transitoires d'attaque et d'extinction des simulations.



# Conclusion et perspectives

Les travaux présentés dans ce rapport ont abordé la prise en compte des perceptions de l'utilisateur pour la conception de produit. Les apports de ce travail sont de deux types :

- sur l'acoustique musicale et la facture instrumentale qui a été l'objet d'application de notre étude ;
- sur la méthodologie de conception.

Nous avons montré comment utiliser les outils de l'analyse sensorielle (profil sensoriel) pour étudier la qualité des instruments de musique. Une liste d'attributs, caractéristiques de la qualité des cuivres, a été définie. Nous avons montré qu'il est possible, pour certains descripteurs (justesse), d'entraîner un panel d'experts pour réaliser les évaluations. Pour les autres descripteurs, les performances de notre panel sont encore insuffisantes. Des épreuves d'entraînements supplémentaires qui n'ont pas été réalisées dans le cadre de cette thèse, devraient améliorer les performances du panel. Néanmoins, il est tout à fait possible que certains attributs de la qualité ne soient pas évaluables directement avec une approche analytique de type "profil sensoriel". En particulier, il peut s'avérer très difficile pour le panel de comprendre le descripteur. De plus, des effets de masquage ou d'interactions entre descripteurs peuvent faire que le panel n'arrive pas à produire des évaluations fiables, même avec beaucoup d'entraînement. Dans ce cadre, les approches de type psycho-linguistiques peuvent être une voie tout à fait intéressante [CAS 05].

Nous avons ensuite montré comment utiliser les données sensorielles du panel pour définir le cahier des charges d'un nouvel instrument. L'apport majeur de ce travail a consisté à utiliser une approche par optimisation pour l'amélioration d'un instrument de musique, l'objectif de l'optimisation étant de définir à partir des critères perceptifs directement liés aux sensations des utilisateurs (musiciens) la paramètres de conception du nouveau produit. Cette approche nous semble originale par rapport aux approches par optimisation classique qui imposent de définir a priori une fonction objectif pour l'optimisation. Le test du nouvel instrument "optimisé" par le panel permettra de confirmer la méthodologie proposée.

Nous avons également produit des résultats sur les outils d'aide à la facture instrumentale, qui sont utilisés dans la démarche de conception proposée. Concernant la bouche artificielle, nous avons montré qu'elle génère des sons dont la perception du timbre en régime permanent est globalement en accord avec les sons générés par un musicien. Ces résultats sont originaux à notre connaissance et complètent les études objectives sur cet outil. Ils laissent espérer son utilisation pour la mise au point de nouveaux instruments. Une expérience intéressante pour alimenter cette remarque, serait de faire la même séance d'enregistrement avec des essayeurs professionnels. Ces personnes, qui testent souvent plus de 50 instruments par jour, ont acquis une "machinalité" dans leur jeu. Il serait intéressant de comparer ces sons avec ceux issus de la bouche artificielle et du musicien non-essayeur. Concernant la bouche artificielle, la piste d'amélioration est la facilité d'utilisation. Il est actuellement fastidieux de régler les paramètres d'entrée pour obtenir plusieurs notes. L'ergonomie de cet outil doit être améliorée pour en faire un véritable banc d'essais adapté à la facture instrumentale.

L'apport majeur de cette étude concerne la réalisation de tests perceptifs avec des sons obtenus par simulation par équilibrage harmonique. Nous avons montré que les différences perceptives entre les sons en régime permanent sont globalement en accord avec celles obtenues sur des sons joués par un musicien ou par une bouche artificielle. Ce résultat permet de penser à introduire les simulations comme outil de mise au point d'instrument. Notons cependant que les sons ont été joués pour une fréquence donnée et que les simulations ne sont pas encore assez robustes pour réitérer ces expériences pour toutes les fréquences de jeu. Il subsiste donc des verrous à lever, notamment sur l'obtention des transitoires, qui jouent un rôle prépondérant sur la reconnaissance du timbre. Une méthode d'optimisation prenant en compte la génération des transitoires d'attaque et d'extinction reste à développer. A ce niveau, les simulations temporelles devront être utilisées. Les premiers résultats que nous avons obtenus avec ces simulations temporelles (non présentés dans ce rapport) sont tout à fait encourageants. L'outil de simulation pourra être utilisé pour valider des hypothèses sur les relations existantes entre les données objectives et les données perceptives. En effet, il est nécessaire de valider la causalité des corrélations pour utiliser la démarche de conception orientée utilisateur. Les simulations, et plus généralement tout outil de réalité virtuelle, peuvent permettre, par une exploration large de l'espace de conception, de valider ces causalités.

Nous avons proposé une méthodologie intégrée de conception, qui permet de capter les préférences de l'utilisateur pour la définition du cahier des charges, et qui utilise une approche par optimisation pour la définition du produit. Cette approche est générique et peut être appliquée à différents types de produits. En particulier, nous avons effectué

certaines étapes de cette démarche sur des sons de moteur (Annexe F). La suite de l'étude consistera à utiliser la cartographie de préférences pour spécifier les caractéristiques des sons.

Cette démarche centrée utilisateur permet également d'avoir un retour rapide sur les décisions de l'ingénieur donc de rester au "plus près" des goûts de l'utilisateur. Par exemple dans notre étude, le client exprime un besoin qui est d'avoir un instrument plus juste. Nous avons choisi de faire varier la branche d'embouchure pour répondre à ses attentes. Si ce choix s'était avéré non judicieux, donc, que les variations de la branche n'engendraient aucune différence perceptivement, nous l'aurions remarqué dès les premiers tests avec les trompettistes sans finir la boucle de conception et faire contrôler le nouveau produit en fin de boucle. L'intervention du client à cette étape peut donc représenter un gain de temps dans le cycle de conception du produit.

Un autre avantage à l'intégration du client dans l'équipe des concepteurs est la prise en compte du côté évolutif de la demande. Dans les méthodes par étapes, le besoin est exprimé au début, puis transmis et interprété de manière séquentielle jusqu'à la production. Entre l'expression du besoin et la mise sur le marché du produit, il peut s'être écoulé beaucoup de temps, et le besoin du client peut avoir évolué. S'il est présent dans la démarche de conception, comme nous le préconisons, cette situation ne se produit pas. L'objectif est donc de concevoir non plus seulement pour le consommateur, mais avec lui. Une des étapes suivantes de ce travail est de transposer cette méthode dans d'autres domaines d'application.

Du point de vue de l'optimisation, d'autres techniques pourraient être explorées. Nous pourrions également envisager d'utiliser les algorithmes génétiques non plus sur le calcul de l'impédance d'entrée de l'instrument mais sur des signaux sonores. Si les simulations fonctionnent de manière stable, nous pourrions envisager de donner les éléments de la géométrie en entrée et de récupérer le son produit par l'instrument désigné en sortie. L'optimisation pourrait alors se faire sur des paramètres issus de ce signal, calculés de façon automatique. Plus généralement, intégrer les outils de réalité virtuelle dans le processus de conception est un sujet d'étude important. Ces outils peuvent être utilisés dès l'expression du besoin jusqu'à l'évaluation des solutions. En effet, les tests perceptifs réalisés pourraient être mis en place grâce à des outils de réalité virtuelle, ce qui éviterait la fabrication coûteuse de prototypes.

Nous avons utilisé des outils simples d'analyse de données de type corrélation. La dernière perspective que nous proposons est des outils d'analyse de données plus complexes pour mettre en correspondance les données objectives et les données perceptives, en prenant en compte les interactions par exemple.





# Références

- [ADA 95] ADACHI S. ET SATO M., “Time-domain simulation of sound production in the brass instrument.”, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 97, pp. 3850–3861, 1995.
- [AKA 93] AKAO Y., “QFD. Prendre en compte les besoins du client dans la conception du produit”. AFNOR, 1993.
- [AUN 03] AUNGST S., BARTON R., ET WILSON D., “The virtual integrated design method”, *Quality Engineering*, Vol. 15, pp. 565–579, 2003.
- [BAS 00] BASSEREAU J., BAUDIN C., NAIMO F., LE COQ M., ET AOUSSAT A., “Représentation et intégration des contraintes de conception liées au consommateur final”, *Proceedings of IDMME2000, Montréal*, May 2000.
- [BEG 98] BEGNIS C., “Etude subjective-objective sur le paramètre d’ouverture de la trompette”. Université des sciences de Luminy, Marseille, 1998. Rapport stage DEA.
- [BEN 76] BENAÏE A., “Fundamentals of musical acoustics.”. Oxford University Press, New York, 1976.
- [BER 03] BERTSCH M., “Bringing instrument control aspects of brass instruments with physics-based parameters”, *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference, Stockholm, Suède*, pp. 193–196, August 2003.
- [BUI 02] BUICK J., KEMP J., SHARP D., VAN WALSTIJN M., CAMPBELL D., ET SMITH R., “Distinguishing between similar tubular objects using pulse reflectometry : a study of trumpet and cornet leadpipes”, *Measurement Science and Technology, Institut of Physics publishing*, Vol. 13, pp. 750–757, 2002.
- [BUS 02] BUSSON S., “Etude des attributs perceptifs d’un ensemble de pianos”. Université du Maine, Le Mans, 2002. Rapport stage DEA.
- [CAM 87] CAMPBELL M., “The musicians’ guide to acoustics”. Oxford University Press, 1987.
- [CAR 02] CARRAL S. ET CAMPBELL M., “The influence of the mouthpiece throat diameter on the perception of timbre of brass instrument”, *Mexico*, 2002.

- [CAS 05] CASTELLENGO M. ET DUBOIS M., “Timbre ou timbres ? Propriété du signal, de l’instrument ou construction cognitive ?”, *Actes du Colloque Interdisciplinaire de Musicologie , CIM05, Montréal (Québec), Canada, 2005.*
- [COL 02] COLLETTE Y. ET SIARRY P., “Optimisation multiobjectif”. Eyrolles, 2002.
- [COR 03] CORMACK J., CAGAN J., ET VOGEL C., “Speaking the Buick language: capturing, understanding, and exploring brand identity with shape grammars”, *Design Studies*, 2003.
- [CRO 04] CROCHEMORE S., BASSEREAU J., ET DUCHAMP R., “Application originale de l’analyse conjointe pour un design robuste de volants ou comment concevoir utile”, *Séminaire CONFERE 04, Nantes, 2004.*
- [CUL 00] CULLEN J., GILBERT J., ET CAMPBELL D., “Brass instruments: linear stability analysis and experiment with an artificial mouth.”, *Acustica - Acta acustica*, Vol. 86, pp. 704–724, 2000.
- [DAL 92] DALMONT J. ET BRUNEAU M., “Acoustic impedance measurement : plane-wave mode and first helicoïdal-mode contributions.”, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 91, pp. 3026–3033, 1992.
- [DAL 01a] DALMONT J., “Acoustic impedance measurements Part I : a review”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 243, No. 3, pp. 427–439, 2001.
- [DAL 01b] DALMONT J., “Acoustic impedance measurements Part II : a new calibration method”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 243, No. 3, pp. 441–459, 2001.
- [DEL 04] DELANGLE C., “Fréquence SELMER: Claude Delangle, générateur d’énergie”. Selmer, 2004.
- [DEP 98] DEPLED F. ET STRIGLER F., “Evaluation sensorielle. Manuel Méthodologique”. Lavoisier Technique et Documentation, 1998.
- [DOR 04] DORE R., “Intégration des sensations utilisateur en conception préliminaire. Application au ski et au virage de base.”. Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers, Paris, 2004. Thèse de doctorat.
- [DUR 04] DURAMPART M. ET BUREAU M., “Etude du système BIAS”. Institut TEchnologique des Métiers de la Musique, 2004. Rapport.
- [ELI 82] ELIOTT S. ET BOWSER J., “Regeneration in brass wind instruments.”, *Acustica - Acta acustica*, Vol. 83, No. 2, pp. 181–217, 1982.
- [FAN 94] FANCHON J., “Guide des sciences et technologies industrielles”. Nathan, 1994.
- [FAR 00] FARINA A. ET TRONCHIN L., “On the ”virtual” reconstruction of sound quality of trumpets.”, *Acustica - Acta acustica*, Vol. 86, pp. 747–755, 2000.
- [FLE 91] FLETCHER N., “The Physics of Musical Instruments”. Springer-Verlag, 1991.

- 
- [FUK 95] FUKUSHIMA K., KAWATA H., FUJIWARA Y., ET GENNO H., “Human sensory perception oriented image processing in a color copy system”, *International Journal of Industrial Economics*, Vol. 15, p. 63, january 1995.
- [GAZ 94] GAZENGEL B., “Caractérisation objective de la qualité de justesse, de timbre et d’émission des instruments à vent à anche simple.”. Université du Maine, Le Mans, 1994.
- [GIL 89] GILBERT J., KERGOMARD J., ET NGOYA E., “Calculation of the steady-state ascillations of a clarinet using the harmonic balance technique”, *J. Acoust. Soc. Am*, Vol. 86, pp. 35–41, 1989.
- [GIL 98] GILBERT J., PONTUS S., ET PETIOT J., “Artificial buzzing lips and brass instruments : experimentals results”, Vol. 104, pp. 1627–1632, 1998.
- [GIL 00] GILBERT J., “Les cuivres”. Université du Maine, Le Mans, 2000. Notes de cours.
- [GIL 02] GILBERT J., TESSIER F., PETIOT J., ET CAMPBELL M., “Analyse comparative d’instruments à vent de type cuivre à partir d’une bouche artificielle”, 2002.
- [GIO 98] GIORDANO J., “Module Conception à l’écoute du client”, *Institut Renault de la Qualité et du Management*, pp. 6–115, octobre 1998.
- [GRE 78] GREY J. ET GORDON J., “Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres”, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 63, pp. 1493–1500, 1978.
- [GUP 01] GUPTA S. ET SAMUEL A., “Integrating market research with the product development process : a step towards design for profit”, *Proceedings of Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference*, 2001.
- [GUY 96] GUYOT F., “Etude de la perception sonore en termes de reconnaissance et d’appréciation qualitative : une approche par la catégorisation.”. Université du Maine, Le Mans, 1996. Thèse de doctorat.
- [HAU 81] HAUSER J. ET SIMMIE P., “Profit maximizing perceptual positions : an integrated theory for the selection of product features and price”, *Management Science*, Vol. 27, Issue 1, pp. 33–56, 1981.
- [IRC ] IRCAM L., “<http://www.ircam.fr/>”,
- [ISO 93] ISO, “Guide général pour la selection, l’entraînement et le contrôle des sujets. Partie 1 : Sujets qualifiés.”, *Norme internationale ISO*, juin 1993.
- [ISO 94a] ISO, “Analyse sensorielle - Recherche et sélection de descripteurs pour l’élaboration d’un profil sensoriel, par approche multidimensionnelle”, *Norme internationale ISO*, 1994.
- [ISO 94b] ISO, “Guide général pour la selection, l’entraînement et le contrôle des sujets. Partie

- 2 : Experts.”, *Norme internationale ISO*, septembre 1994.
- [ITE 04] ITEM, “Musique et technique. Revue professionnelle de la facture instrumentale.”. ITEM, 2e semestre 2004. n°0.
- [KOP 96] KOPPE D., “La trompette dans la seconde moitié du vingtième siècle : facture et interprétation”. Université de Paris IV, UFR de musique et musicologie, 1996. Rapport de thèse.
- [KRI 93] KRIMPHOFF J., “Analyse acoustique et perception du timbre”, 1993. Rapport de stage DEA Le Mans.
- [KRI 94] KRIMPHOFF J., MC ADAMS S., ET WINSBERG S., “Caractérisation du timbre des sons complexes. Analyses acoustiques et quantification psychophysique.”, *Journal de physique IV, colloque C5, supplément du journal de Physique III*, Vol. 4, 1994.
- [LC 03] LE CARROU J., “Etude expérimentale de la perception de sons de trompette”. Université du Maine, Le Mans, 2003. Rapport de stage.
- [LEI 89] LEIPP E., “Acoustique et Musique”. Masson, 1989.
- [LIQ 01] LIQUET J. ET BENAVENT C., “L’analyse conjointe et ses applications en marketing”. IAE de Lille, <http://christophe.benavent.free.fr/cours/stat.conjointe.PDF>, 2001.
- [LOW 99] LOWE A., “Introduction to Quality Function Deployment”. The University of Sheffield, <http://www.shef.ac.uk/~ibberson/QFD-IntroII.html>, 1999.
- [MAN 04] MANTELET F., BOUCHARD C., ET AOUSSAT A., “Intégration et optimisation des méthodes KANSEI dans le processus de conception de produits nouveaux”, *Séminaire CONFERE 04, Nantes*, 2004.
- [MAN 05] MANTELET F., BOUCHARD C., ET AOUSSAT A., “Prise en compte de la perception des utilisateurs dans la conception de produit en analysant la corrélation entre les descripteurs sémantiques et les éléments formels du produit”, *9e colloque AIP Primeca, La Plagne*, 2005.
- [MAT 04] MATTEI A., “Statistique”. HEC, Lausanne, <http://www.hec.unil.ch/amattei>, 2004. Notes de cours.
- [MIC 88] MICHELS U., “Guide illustré de la musique”. Fayard, 1988.
- [MSA 98] MSALLAM R., “Modèles et simulations numériques de l’acoustique non-linéaire dans les conduits. Application à l’étude des effets non-linéaires dans le trombone et à la synthèse sonore par modèle physique.”. Université de Paris VI, 1998. Rapport de thèse.
- [NAG 95] NAGAMACHI M., “Kansei Engineering: A new ergonomic consumer-oriented technology for product development”, *International Journal of Industrial Economics*, Vol. 15, pp. 3–11, 1995.

- 
- [NOR 03] NORELAND D., “Numerical techniques for acoustic modelling and design of brass wind instrument”. Uppsalat Universitet, 2003. Ph. D. Thesis.
  - [PAH 96] PAHL G. ET BEITZ W., “Engineering design. A systematic approach.”. Springer, 1996.
  - [PET 03] PETIOT J., TESSIER F., GILBERT J., ET CAMPBELL M., “Comparative analysis of brass wind instruments with an artificial mouth : first results”, *Acta acustica*, Vol. 89, pp. 974–979, 2003.
  - [PET 04] PETIOT J. ET YANNOU B., “Measuring consumer perceptions for a better comprehension, specification and assessment of product semantics”, *International Journal of Industrial Ergonomics*, Vol. 33, pp. 507–525, 2004.
  - [PLI 99] PLITNIK G. ET LAWSON B., “An investigation of correlations between geometry, acoustic variables, and psychoacoustic parameters for French horn mouthpieces”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 106, pp. 425–435, August 1999.
  - [PRA 78] PRATT R. ET BOWSER J., “The subjective assessment of trombone quality”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 57, pp. 425–435, 1978.
  - [PRA 79] PRATT R. ET BOWSER J., “The objective assessment of trombone quality”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 65, pp. 521–547, 1979.
  - [SCH 78] SCHUMACHER R., “Self sustained oscillations of the clarinet: an integral equation approach.”, *Acustica*, Vol. 40, pp. 298–309, 1978.
  - [SCH 81] SCHUMACHER R., “Ab initio calculations of the oscillations of a clarinet.”, *Acustica*, Vol. 48, pp. 73–84, 1981.
  - [SFA 05] SFA, “Groupe Spécialisé d’Acoustique Musicale”. France, <http://www.sfa.asso.fr/fr/gsam/gsam.htm>, 2005. Site Web.
  - [SHA 03] SHARP D., “An acoustical investigation into the effect of the crook profile on the sound produced by the bassoon”, *Acta Acustica united with Acustica*, Vol. 89, pp. 137–144, 2003.
  - [SKö 05] SKÖLD A., VÄSTFJÄLL D., ET KLEINER M., “Perceived sound character and objective properties of powertrain noise in car compartments”, Vol. 91, pp. 349–355, 2005.
  - [TAN 97] TANOUE C., ISHIZAKA K., ET NAGAMACHI M., “Kansei Engineering : A study on perception of vehicle interior image”, *International Journal of Industrial Economics*, Vol. 19, pp. 115–128, 1997.
  - [TAS 92] TASSINARI R., “Pratique de l’analyse fonctionnelle”. DUNOD, 1992.
  - [THO 95] THORETON S., “Comparaison de plusieurs trompettes par la caractérisation objective et par la collecte de l’analyse des opinions d’instrumentistes professionnels”.

- Université du Maine, Le Mans, 1995. Rapport stage DEA.
- [URD 01] URDAPILLETA I., TON NU C., SAINT DENIS C., ET HUON DE KERMADEC F., “Traité d’évaluation sensorielle. Aspects cognitifs et métrologiques des perceptions”. Dunod, 2001.
- [VER 00] VERGEZ C., “Trompette et trompettiste : un système dynamique non linéaire à analyser, modéliser et simuler dans un contexte musical”. Institut de Recherche en Coordination Acoustique et Musique, 2000. Rapport de thèse.
- [VER 01] VERNETTE E., “L’essentiel du marketing”. Editions d’organisation, 2001.
- [WID ] WIDHOLM G., “BIAS”. Vienna Institut für Wiener Klangstil, <http://www.bias.at>. site web.
- [WRI 96] WRIGHT H., “The acoustics and psychoacoustics of the guitar”. University of Wales, Cardiff, 1996. PhD report.
- [WRI 98] WRIGHT H. ET CAMPBELL M., “The influence of the mouthpiece on the timbre of cup-mouthpiece wind instrument”, *ISMA 98, Leavenworth, Washington, USA*, 1998.
- [YOS 04] YOSHIMURA M. ET PAPALAMBROS P., “Kansei Engineering in concurrent product design : a progress review”, *Proceedings of the TMCE 2004, Lausanne, Switzerland*, April 2004.

A

---

# Fiches d'évaluation



Fiche de la séance d'entraînement

Évaluation de la Trompette ...

Justesse générale

Fausse

Juste

Écart de hauteur du mi (0) et mi ( )

Important

Très faible

Centrage

Mauvais

Bon

Réponse

Mauvais

Bon

Palette sonore grave

Restreinte

Grande

Palette sonore médium

Restreinte

Grande

Palette sonore aigu

Restreinte

Grande

Timbre général

Sombre

Voilé

Référence

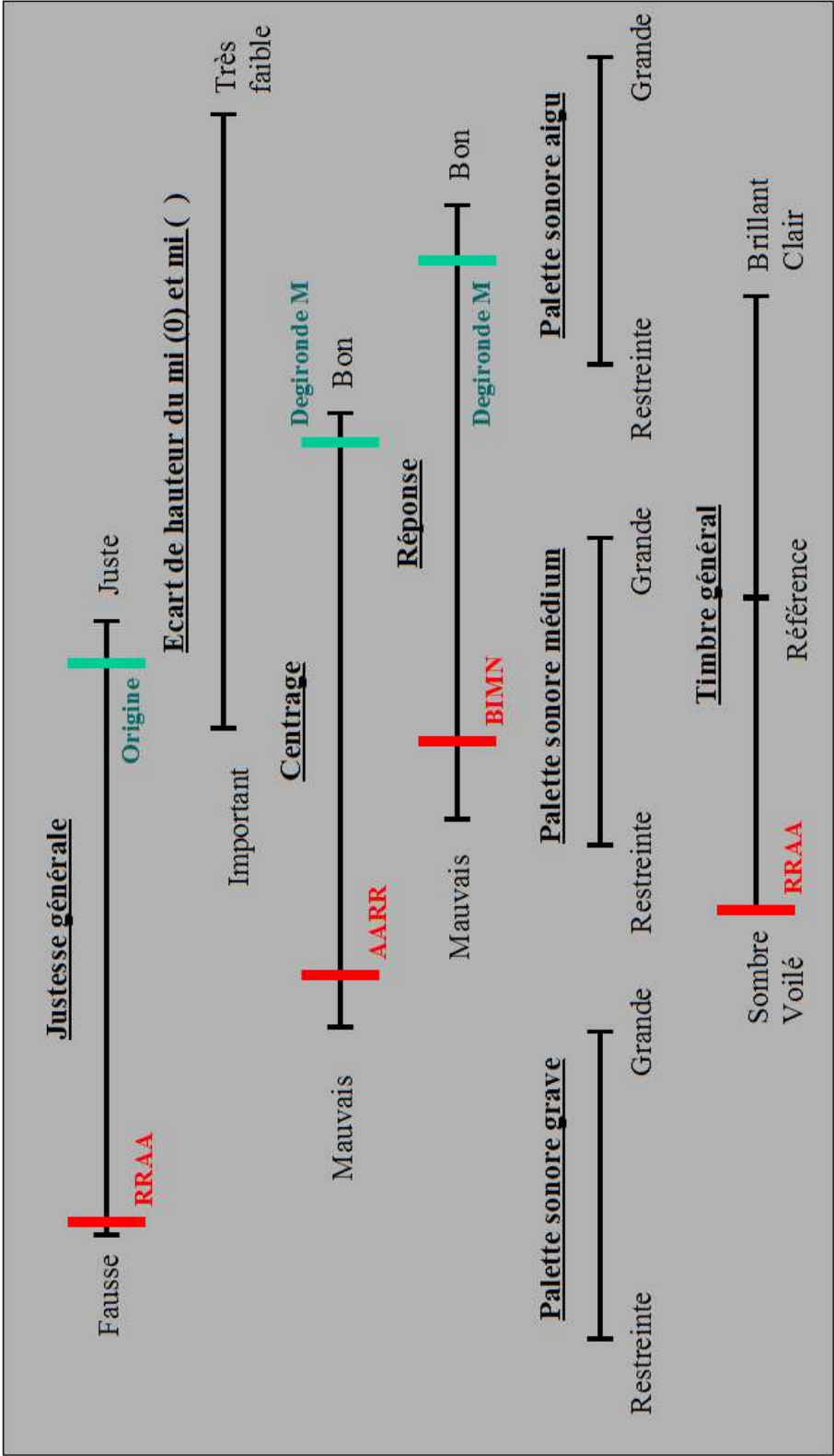
Brillant

Clair

Commentaires:

Points d’ancrage de la séance d’entraînement

Évaluations : Références



Commentaires:

## Évaluation de la Trompette ...

<p><b><u>Justesse générale à vide</u></b></p> <p>Fausse ————— Juste</p>		<p><b><u>Problèmes rencontrés:</u></b></p>	
<p><b><u>Augmentation de hauteur du mi (0) et mi (12)</u></b></p> <p>Importante ————— nulle</p>			<p><input type="checkbox"/> Mi (12) plus bas que mi (0)</p>
<p><b><u>Timbre général</u></b></p> <p>Plus Sombre ————— Plus Brillant</p> <p>Plus Voilé ————— Référence</p>			
<p><b><u>Commentaires:</u></b></p>			

# Résultats des experts (séance d'entraînement)

## Expert 1

	Justesse		Mi		Centrage		Réponse	
AAAE	3.1	3.03	2.5	4.6	6.2	5.8	6.2	6.2
	3		5.4		6		6.2	
	3		5.9		7.2		6.2	
DKOS	6	7	4.2	6.87	4	6.4	5.4	6.73
	8.7		7.4		7.4		7.6	
	6.3		9		7.8		7.2	
IFJN	9.2	7.1	8.4	6.8	7.5	7.3	7.6	7.03
	6.2		5.8		6.6		6.3	
	5.9		6.2		7.8		7.2	
CHMQ	8.2	8.4	8.3	7.93	7.6	7.43	8.1	7.93
	8.8		8.5		8		8.2	
	8.2		7		6.7		7.5	
	Grave		Medium		Aigu		Timbre	
AAAE	5	5.6	5	5.57	5	5.07	4	4.53
	7.4		7.2		6		4.3	
	4.4		4.5		4.2		5.3	
DKOS	3.6	5.93	2.6	6.07	3.2	5.93	3.7	4.23
	7		7.8		7.4		3.6	
	7.2		7.8		7.2		5.4	
IFJN	6	6.13	6.7	6.63	6.6	6.2	4	4.07
	5.8		6		5.4		3.7	
	6.6		7.2		6.6		4.5	
CHMQ	7	7.13	7.4	7.33	7.4	7.33	7	6.17
	7.6		7.6		7.6		6	
	6.8		7		7		5.5	

## Expert 2

	Justesse		Mi		Centrage		Réponse	
AAAE	5.5	5.37	6.7	7.07	9.5	8.77	1.4	6.2
	3.8		7.5		7.8		8	
	6.8		7		9		9.2	
DKOS	5.8	7.53	1	6.27	7	7.93	7.5	8.73
	7.3		9.2		7.3		9.3	
	9.5		8.6		9.5		9.4	
IFJN	8.4	8.9	7.5	7.23	1.5	6.13	8.2	8.53
	9		4.9		7.3		7.9	
	9.3		9.3		9.6		9.5	
CHMQ	7.5	7.87	6.6	8.03	7.5	8.57	6.8	7.70
	7		9		9.5		9.1	
	9.1		8.5		8.7		7.2	
	Grave		Medium		Aigu		Timbre	
AAAE	1	5.73	2	6.33	5	5.4	1.6	3.6
	7.6		8.2		2.8		1.4	
	8.6		8.8		8.4		7.8	
DKOS	2.8	3.33	5	5.33	7	7.53	2.8	5.03
	2.6		5		7.6		6.1	
	4.6		6		8		6.2	
IFJN	7	7.53	6	6.33	5	6.07	2.6	3.6
	8.2		6		6		4.4	
	7.4		7		7.2		3.8	
CHMQ	1.6	5.13	3.2	6.33	5.2	7.27	2.4	4.77
	5		8.2		7.8		7	
	8.8		7.6		8.8		4.9	

## Expert 3

	Justesse		Mi		Centrage		Réponse	
AAAE	2.1	1.57	2.5	4.2	9	6.03	3.9	4.83
	1.3		8		2.1		6.8	
	1.3		2.1		7		3.8	
DKOS	7	8.1	5.2	5.23	7.5	7.97	5.7	5.07
	8.9		2		7.6		2.6	
	8.4		8.5		8.8		6.9	
IFJN	6	7.2	2.1	3.73	1.5	3.43	6.6	5.87
	7.5		6.6		7.5		2.5	
	8.1		2.5		1.3		8.5	
CHMQ	8.9	9.1	8.4	7.4	5.6	3.87	2.9	5.2
	9.2		7.3		3.1		3.7	
	9.2		6.5		2.9		9	
	Grave		Medium		Aigu		Timbre	
AAAE	8.8	8.2	3.4	5.13	3.2	2.27	1.5	5.4
	8.4		8.4		1		7.6	
	7.4		3.6		2.6		7.1	
DKOS	2.6	4.07	3	6.07	7	6.87	1.3	4.8
	2.4		8		8.2		7.8	
	7.2		7.2		5.4		5.3	
IFJN	7.6	5.73	7.6	6.53	2.2	4.07	7.2	6.33
	2		5		7		6.5	
	7.6		7		3		5.3	
CHMQ	8.4	6.87	8.4	8.2	3.2	4.47	5.7	7.6
	3.8		7.8		1.8		8.8	
	8.4		8.4		8.4		8.3	

## Expert 4

	Justesse		Mi		Centrage		Réponse	
AAAE	6.2	3.2	5.1	3.07	9	8.2	1.1	5
	2.1		2.2		8.3		7.6	
	1.3		1.9		7.3		6.3	
DKOS	4.3	3.63	4.1	3.47	7.8	7.07	7.3	6.3
	1.5		0.8		7.3		6.7	
	5.1		5.5		6.1		4.9	
IFJN	8	7.77	5.3	5.03	8.8	5.93	7.9	5.17
	8.4		7.5		2.5		3.6	
	6.9		2.3		6.5		4	
CHMQ	8.8	8.43	8.5	7.97	3	4.47	5.1	5.2
	9		8.4		3.4		8	
	7.5		7		7		2.5	
	Grave		Medium		Aigu		Timbre	
AAAE	7.6	7.47	4.6	6.07	5.8	5.6	2.7	3.8
	7.6		8.2		8.6		6	
	7.2		5.4		2.4		2.7	
DKOS	3.2	5.73	4	6	4.6	5.27	4.5	5.77
	7		6.6		7		5.8	
	7		7.4		4.2		7	
IFJN	5	4.53	5	4.53	2	2.8	3.5	3.9
	4.4		4.2		3.6		5	
	4.2		4.4		2.8		3.2	
CHMQ	5	6.33	4.2	5.73	5	6.8	6.3	5.43
	7.6		8		8		5	
	6.4		5		7.4		5	

## Expert 5

	Justesse		Mi		Centrage		Réponse	
AAAE	2.1	1.63	2.6	3.6	6.4	5.03	3.4	4.8
	0.4		1.4		6.7		6.3	
	2.4		6.8		2		4.7	
DKOS	3.4	4.33	1.8	3.63	7.1	5.4	4	3.93
	2		0.2		1.1		1.5	
	7.6		8.9		8		6.3	
IFJN	0.9	3.67	0.4	3.6	2.4	5.8	2.3	4.97
	6.8		7.9		8.3		9	
	3.3		2.5		6.7		3.6	
CHMQ	8.7	7.3	9.4	9.43	9.4	8.8	8.3	7.17
	3.8		9.3		7.5		4.3	
	9.4		9.6		9.5		8.9	
	Grave		Medium		Aigu		Timbre	
AAAE	5	5.53	4.2	5.2	2.4	4.47	1.6	2.63
	3.8		4.8		4		1.8	
	7.8		6.6		7		4.5	
DKOS	2.2	4.73	6.8	5.53	7.4	6.2	3.1	5.43
	5.4		2.2		3.6		7.4	
	6.6		7.6		7.6		5.8	
IFJN	3	4.8	2	4.33	6.2	6.47	1.3	3.83
	6.8		7.4		7.6		6.7	
	4.6		3.6		5.6		3.5	
CHMQ	7.2	6.53	7.2	7.4	7.4	7.6	8.7	5.47
	4.4		6.6		7		2.8	
	8		8.4		8.4		4.9	



## Expert 6

	Justesse		Mi		Centrage		Réponse	
AAAE	0.3	0.83	0.2	3	9.7	7.07	6.7	6.3
	1.4		6.2		2		3	
	0.8		2.6		9.5		9.2	
DKOS	9.4	8.63	5.7	5.3	4.9	5.37	8.8	7.5
	9.5		7.1		3		7.6	
	7		3.1		8.2		6.1	
IFJN	9	5.43	6.9	6.1	8.9	8.63	1.6	3.1
	1.2		4.3		9.3		3.7	
	6.1		7.1		7.7		4	
CHMQ	9.6	7.37	9.7	6.4	9.7	9.17	9.6	9.27
	9.4		6.9		9.1		9.4	
	3.1		2.6		8.7		8.8	
	Grave		Medium		Aigu		Timbre	
AAAE	3.8	6.8	1.8	6.27	6.2	7.6	0.6	2.97
	8.8		8.4		8		5	
	7.8		8.6		8.6		3.3	
DKOS	0.6	6.13	0.6	6.4	4	7.33	1.2	2.37
	9		9.2		9		3.6	
	8.8		9.4		9		2.3	
IFJN	9.2	6.4	1.2	2.53	1.4	5.67	4.5	4.8
	8.4		1.4		9		4.3	
	1.6		5		6.6		5.6	
CHMQ	9.2	6.73	9.2	8.87	8.6	8.87	4.5	5.3
	8.8		9		8.8		5.9	
	2.2		8.4		9.2		5.5	

## Expert 7

	Justesse		Mi		Centrage		Réponse	
AAAE	2.7	2.03	1.8	2.7	9.1	8.23	9.3	8.03
	1.8		3.5		7.3		6.6	
	1.6		2.8		8.3		8.2	
DKOS	8.8	8.03	8.9	5.7	9.1	6	9.2	8.57
	8.8		2		6.7		8.5	
	6.5		6.2		2.2		8	
IFJN	9.2	8.87	2.4	2.5	9.2	7.6	9.3	8.7
	9.1		3.2		7.3		7.9	
	8.3		1.9		6.3		8.9	
CHMQ	6.6	8.37	3.8	3.07	9.1	9.1	9.4	9.33
	9.3		2.1		9		9.2	
	9.3		3.3		9.2		9.4	
	Grave		Medium		Aigu		Timbre	
AAAE	2.8	5.27	7.8	7.4	7.4	7.27	2.5	5.03
	6		7		7.4		5.3	
	7		7.4		7		7.3	
DKOS	8.2	6.33	8.4	8.2	9.2	8.47	4.8	5.63
	8.8		9		9.2		4.8	
	2		7.2		7		7.3	
IFJN	8.4	7	8.2	7.4	8.4	8.4	4.5	5.47
	5.2		6.6		8.6		6.7	
	7.4		7.4		8.2		5.2	
CHMQ	2.8	5.27	7.6	8	8.6	8.13	5.6	5.3
	4.4		7.8		7.6		5.3	
	8.6		8.6		8.2		5	

## Expert 8

	Justesse		Mi		Centrage		Réponse	
AAAE	1.8	1.63	3	1.83	6	4.57	3.1	3.57
	1.2		0.8		4.2		4.1	
	1.9		1.7		3.5		3.5	
DKOS	7.1	6.03	7.6	7.23	4.7	6.07	4.9	5.6
	5.8		7.9		6.8		4.8	
	5.2		6.2		6.7		7.1	
IFJN	4.2	4.37	3.4	4.37	5.1	4.33	5.5	4.17
	4.2		6		4.5		3.5	
	4.7		3.7		3.4		3.5	
CHMQ	5.8	3.97	6.2	5.27	5.1	4.97	5.7	5.7
	3.5		3.9		6.4		6.2	
	2.6		5.7		3.4		5.2	
	Grave		Medium		Aigu		Timbre	
AAAE	2.4	4.4	2.8	4.6	3	4.6	2.8	3.87
	6		6.4		6.4		5.9	
	4.8		4.6		4.4		2.9	
DKOS	5	5.2	3.6	4.73	2.4	4.87	3.6	3.77
	3.8		3.6		5.2		3.7	
	6.8		7		7		4	
IFJN	2.6	3.33	3	3.47	2.4	2.73	6.2	6.43
	3.6		3.4		2		6.7	
	3.8		4		3.8		6.4	
CHMQ	6.6	4.2	6.8	5.33	6.6	6.4	6.1	5.8
	3.8		5		6.6		5.7	
	2.2		4.2		6		5.6	

## Expert 9

	Justesse		Mi		Centrage		Réponse	
AAAE	0.2	0.3	8.3	7.37	3.4	4.47	4.5	6.1
	0.2		4.9		5.2		5.2	
	0.5		8.9		4.8		8.6	
DKOS	8.2	7.33	7.4	6.9	5.1	6.63	0.6	1.67
	7.7		7.8		9.5		3.8	
	6.1		5.5		5.3		0.6	
IFJN	8.6	6.03	4.6	6.13	8.8	9.23	5	5.83
	4.5		8.7		9.2		8.5	
	5		5.1		9.7		4	
CHMQ	9	9.33	8.9	9.37	9	9.43	2.6	7.23
	9.6		9.7		9.6		9.6	
	9.4		9.5		9.7		9.5	
	Grave		Medium		Aigu		Timbre	
AAAE	1.2	4.87	4.6	5.8	4.6	6.07	5	2.87
	5		4.8		5.2		1.6	
	8.4		8		8.4		2	
DKOS	0.6	0.87	1	3.47	1.6	4.13	5	6.5
	1		8.4		8.6		5	
	1		1		2.2		9.5	
IFJN	0.6	2.87	0.6	2.73	0.6	0.6	4.6	3.57
	7.6		7.2		0.8		2	
	0.4		0.4		0.4		4.1	
CHMQ	0.2	3.53	6.2	6.4	6.4	6.93	3	1.43
	9		9.2		9.2		0.4	
	1.4		3.8		5.2		0.9	

## Expert 10

	Justesse		Mi		Centrage		Réponse	
AAAE	7.5	4.93	2.2	2.8	7	6.63	7.5	7.6
	3.3		2.7		5.5		6.9	
	4		3.5		7.4		8.4	
DKOS	8.8	8.8	7.6	7.3	6.8	6.97	7.5	7.6
	9		7.5		8.1		7.8	
	8.6		6.8		6		7.5	
IFJN	7.1	6.5	5.3	5.73	6.3	5.67	8.8	7.3
	3.8		3.3		3.6		7.3	
	8.6		8.6		7.1		5.8	
CHMQ	9.2	8.83	3.9	6.83	8.9	6.6	8	7.27
	8.2		7.8		4.7		7.8	
	9.1		8.8		6.2		6	
	Grave		Medium		Aigu		Timbre	
AAAE	7.4	6	7.4	6.93	7.4	6.6	4.5	4.4
	4		8		7.2		5.2	
	6.6		5.4		5.2		3.5	
DKOS	8.4	6.53	8.4	7.73	8.4	7.93	4.2	5.83
	7		8.4		8.4		7.1	
	4.2		6.4		7		6.2	
IFJN	4.4	3.93	7.6	6.67	7.8	6.33	6.2	4.83
	2.4		7		5.2		3.7	
	5		5.4		6		4.6	
CHMQ	7.6	6.87	7.6	7.07	7.8	7	6.5	5
	7		7.4		7		6.5	
	6		6.2		6.2		5	

---

# Résultats du test de la PPDS pour la séance d'entraînement

## Justesse

	AAAE	DKOS	IFJN	CHMQ
AAAE	-	7	7	9
DKOS		-	1	2
IFJN			-	2
CHMQ				-

## Test du Mi

	AAAE	DKOS	IFJN	CHMQ
AAAE	-	2	1	3
DKOS		-	1	1
IFJN			-	0
CHMQ				-

## Grave

	AAAE	DKOS	IFJN	CHMQ
AAAE	-	0	1	0
DKOS		-	0	0
IFJN			-	0
CHMQ				-

## Médium

	AAAE	DKOS	IFJN	CHMQ
AAAE	-	0	0	0
DKOS		-	0	0
IFJN			-	0
CHMQ				-

## Aigu

	AAAE	DKOS	IFJN	CHMQ
AAAE	-	0	1	0
DKOS		-	0	0
IFJN			-	3
CHMQ				-

## Timbre

	AAAE	DKOS	IFJN	CHMQ
AAAE	-	0	1	2
DKOS		-	1	4
IFJN			-	1
CHMQ				-

# Résultats individuels de la séance d'évaluation

## Expert 1

Branches	Justesse	Test Mi	Timbre
ACHN	7.8	6.6	4.5
	3.6	7.8	5.6
CHNR	7.8	4.2	4.8
	8	6.9	5.7
DKOS	4.8	7.3	5.5
	7.8	7.5	5.5
BFLN	8.5	6.3	5.5
	8.6	7.4	5.6
CGJQ	8.4	6.3	5.5
	6.9	5.4	6
CIPQ	8.3	6.7	5.5
	7	4.2	5.7
DKLN	9.4	8.2	3.2
	8	6.8	4.6
CHMQ	8.7	3.9	3.9
	7.7	5.6	4.5
ABFN	5.2	7.8	4
	5.9	5.4	4.5
ADKN	7.1	8.3	4.7
	8.5	7.6	4.2
BFOS	8.4	5.5	4.6
	6.6	6	4.8
DKNR	6	6	4.3
	8.2	5.4	4.7



## Expert 2

Branches	Justesse	Test Mi	Timbre
ACHN	8.3	0.6	3.7
	9.2	1.6	6.9
CHNR	1.7	0.5	4
	4.8	2.3	3.9
DKOS	1.5	1.9	4.3
	5.2	8.1	4.6
BFLN	9.8	4.7	5
	9.9	3.4	5.1
CGJQ	7.1	6.6	5.9
	4.5	0.8	7.5
CIPQ	9.1	9.8	6.4
	1.3	0.3	4
DKLN	3.4	3	2.1
	7.4	7.4	4
CHMQ	3.4	8.7	6.9
	8.6	3.8	5
ABFN	9.5	5.7	5
	8.7	4.3	3.3
ADKN	8.6	8.9	6.1
	9.8	8.9	4.7
BFOS	8.7	5.7	6.2
	10	10	6.2
DKNR	2.7	9.9	4
	2.2	9.9	8.4

## Expert 3

Branches	Justesse	Test Mi	Timbre
ACHN	9.9	1.9	3.1
	6.9	5.4	7.1
CHNR	6.6	6.5	5.8
	9.6	6.6	4
DKOS	4.3	3.9	2.8
	9.8	4.6	7.4
BFLN	7.2	7	6.6
	8.5	7.8	5
CGJQ	8.3	7.7	3.1
	9.8	5.9	6.8
CIPQ	6.8	7.3	4.2
	9.7	6.1	3.9
DKLN	9.7	1	3.8
	6.4	3.3	2.5
CHMQ	9.8	4.8	6.2
	8.6	6.9	5.7
ABFN	9.4	3.3	4.7
	4.5	4.8	7.1
ADKN	9.9	4.3	5.7
	9.9	6.2	5
BFOS	6.9	7.1	4.4
	6	4.3	4.7
DKNR	6.3	2.4	5
	8.1	7	3.5

## Expert 4

Branches	Justesse	Test Mi	Timbre
ACHN	9.4	9.1	4.6
	3.9	7.7	4.2
CHNR	2.2	9.5	2.7
	6.7	7.3	6
DKOS	3.1	0.9	5.6
	0.8	3.9	7.5
BFLN	6.9	3.4	3.7
	5	5.1	6.3
CGJQ	9.4	6.2	4.7
	1.7	7.4	3.7
CIPQ	7.8	9.6	4.6
	4.9	6.3	4.6
DKLN	3.5	3.2	4.3
	3	3.3	3.4
CHMQ	0.7	1.8	0.7
	0	1.7	2.1
ABFN	9.5	2.5	4.2
	4.8	2	7.6
ADKN	7.9	9.3	6.9
	10	7.5	4.2
BFOS	6.4	5	4.4
	4.8	8.3	5.9
DKNR	3.8	3	8.6
	9.3	8	5.8

## Expert 5

Branches	Justesse	Test Mi	Timbre
ACHN	9.2	9.1	1.8
	10	8.6	1.3
CHNR	7.9	1.3	2.8
	10	10	1.2
DKOS	10	1.9	1.1
	1.5	9.8	4.1
BFLN	9	0	4.1
	9.7	9.2	0.8
CGJQ	8.9	9.6	6
	8.8	3.9	0.9
CIPQ	8.7	7.8	2.2
	9	9.8	4.8
DKLN	2.3	8.6	2.6
	8.7	9.7	2.6
CHMQ	9.4	8.4	3.2
	10	10	2.3
ABFN	9.6	9.5	6.4
	9.2	6.8	7.6
ADKN	10	10	6.1
	9.7	2	5.8
BFOS	9.6	9.3	6.3
	10	8.7	3.5
DKNR	3.8	1.9	8.2
	9.8	8.2	8.6

## Expert 6

Branches	Justesse	Test Mi	Timbre
ACHN	9.8	9.6	2.5
	9.8	9.6	4.8
CHNR	9.8	7.5	3.7
	9.6	8.7	4.9
DKOS	9.5	7.5	3.4
	9.5	9.6	2.4
BFLN	9.3	7.1	4.6
	9.7	8.2	2.8
CGJQ	9.2	8	3.8
	9.5	7.9	4.5
CIPQ	9.6	6.4	4.8
	9.3	9.4	4.5
DKLN	9.7	9.7	3.7
	9.6	7.6	1.9
CHMQ	9.5	9.4	4.8
	9.6	8	4.4
ABFN	9.6	9.5	4.6
	7.2	7.9	4.5
ADKN	9.5	9.5	3
	9.7	7.5	2.7
BFOS	9.8	6	2.6
	8.7	8.7	2.2
DKNR	9.6	9.7	1.3
	9.6	9.6	3.8

## Expert 7

Branches	Justesse	Test Mi	Timbre
ACHN	8.6	7.9	5.2
	9.8	0.8	4.9
CHNR	7.7	6.7	4.9
	8.9	1.9	5.2
DKOS	10	1.6	5.1
	10	2.8	5
BFLN	8.1	2.9	6.2
	9.9	3.7	6
CGJQ	9.9	1	5.5
	9.8	1.4	5
CIPQ	4.7	2.4	5.5
	4.7	1.1	5.6
DKLN	10	1.2	2.1
	9.1	4.7	5.1
CHMQ	9.9	5.1	4.7
	4.4	9	5.1
ABFN	2.6	9.8	5
	8.3	7.2	4.4
ADKN	8.9	1.3	5.2
	10	7.3	5
BFOS	9.5	6.5	4.5
	10	1.6	4.4
DKNR	6.6	5.4	4
	4.8	5.2	2.4

## Expert 8

Branches	Justesse	Test Mi	Timbre
ACHN	6.3	4.7	6.2
	7.5	5.5	6.9
CHNR	4.2	7.8	6.2
	6.8	6.7	6
DKOS	4.3	7.4	5.6
	4.1	4.2	5.2
BFLN	5.8	7	5.5
	6.2	7.7	4.5
CGJQ	7	7.5	6.6
	2.9	3.1	4.7
CIPQ	3.6	6.3	5.6
	1.9	3	5.5
DKLN	4.5	4	3.9
	2.9	2.8	4.3
CHMQ	5.2	7.1	4.9
	1.6	2.8	3.7
ABFN	1.6	1.7	3.5
	4.6	4.2	6.2
ADKN	6	7.8	6.4
	6.9	4.7	6.8
BFOS	6.9	3	3.8
	5.9	5.5	5.9
DKNR	2.4	2.5	3.4
	4	6.2	4.6

## Expert 9

Branches	Justesse	Test Mi	Timbre
ACHN	8.9	0.9	4.1
	9.5	1.1	4.2
CHNR	7.8	5.1	2.9
	9.3	0.9	4.5
DKOS	9.8	0.6	2.6
	9.6	8.9	4.2
BFLN	9.5	9.2	4.6
	6.9	1.6	3
CGJQ	9.3	3.9	3.8
	7.6	1.2	4.6
CIPQ	9.3	3	4.5
	9.1	4	3.6
DKLN	9.3	1.1	2.4
	8.3	4.4	3.8
CHMQ	8.5	3	4.5
	9.5	3.4	6.1
ABFN	7.9	1.5	4.5
	8.3	2.9	5.8
ADKN	9.5	4.5	5
	9.5	6.5	4.2
BFOS	9.6	4.1	4
	7.7	5	5
DKNR	9.3	4.1	3.8
	9.5	7.3	4.7





---

# Optimisation des longueurs des dérivations associées aux pistons

Durant la réunion - brainstorming décrite dans le paragraphe 2.2, les trompettistes avaient insisté sur le fait que pour tester la justesse de l'instrument, ils comparaient la même note jouée avec un doigté usuel et avec un ou plusieurs doigtés factices. Cependant, il n'est pas prouvé que "plus les doigtés factices sont proches des doigtés usuels, plus la trompette est juste en général". C'est ce que nous voulons vérifier dans la suite de cette annexe, en utilisant l'approche de la "longueur équivalente" [CAM 87] pour calculer la fonction d'optimisation.

## Présentation du problème

La trompette est dotée de trois pistons, notés 1, 2 et 3 pour les doigtés, le 0 étant sans piston, position dite "à vide". Par exemple, la position 12 signifie que les pistons 1 et 2 sont enfoncés. Lorsque l'on appuie sur un piston, le tuyau est rallongé, ce qui baisse la note (en fréquence). Le premier piston a pour effet de baisser la note d'un ton. Le second, d'un demi-ton et le troisième d'un ton et demi. Le doigté à vide de la trompette donne les harmoniques de Do. Le piston 1 enfoncé donne celles de  $S\flat$ , le piston 2 celles de Si et le piston 3 celles de La. Or, les pistons peuvent être combinés. Ainsi, en enfonçant les pistons 1 et 2, la note est abaissée d'1 ton  $1/2$ , ce qui est équivalent au piston 3. Il est donc possible de jouer une même note avec plusieurs doigtés.

Tout d'abord, nous avons calculé la longueur idéale de chaque piston. Pour cela, nous nous sommes basés sur 2 hypothèses :

- (H1) avec le doigté "à vide", la trompette peut produire une série harmonique (donc, des notes justes) correspondante à celle d'un cône de longueur  $L$  ;
- (H2) l'ajout d'une longueur  $\Delta L$  permet de jouer une série harmonique correspondante à celle d'un cône de longueur  $L + \Delta L$ .

Pour faire le calcul, le modèle est basé sur une variation de longueur inversement proportionnelle à la fréquence (Eq. E.1 et E.2). C'est la relation sur les longueurs équivalentes.

$$F_{1n} = \frac{n.c_0}{2.L1} \quad \text{et} \quad F_{2n} = \frac{n.c_0}{2.L2} \quad (\text{E.1})$$

donc,

$$\frac{F_{1n}}{F_{2n}} = \frac{L_2}{L_1} \quad (\text{E.2})$$

Or, ce qui nous intéresse est la différence entre L1 et L2 (équation E.3.

$$\Delta L = L_1 \cdot \frac{F_{1n} - F_{2n}}{F_{2n}} \quad (\text{E.3})$$

La longueur de la trompette à vide,  $L_{vide}$ , est de 141cm et *Sib3* joué dans cette position est juste à 466.16Hz (juste dans un tempérament égal, avec  $La3 = 440\text{Hz}$ ). L'objectif est de trouver  $L_1$ , la longueur du premier piston, telle que la note jouée en position 1, le *Lab3* soit juste, donc à 415.3Hz. L'équation précédente nous donne donc  $L_1 = 17.27\text{cm}$ . De la même façon, on calcule  $L_2 = 8.38\text{cm}$  et  $L_3 = 26.67\text{cm}$ . Cela signifie que, avec des pistons de cette longueur, toutes les notes jouées en doigté à vide, 1, 2 ou 3 seront justes. Il nous faut maintenant vérifier si les combinaisons de pistons donnent également des notes justes.

## Calcul des fréquences et des écarts

D'après l'hypothèse 1 (H1), les notes à vide (position 0) sont justes pour un diapason choisi à 440Hz (*La3* à une fréquence de 440Hz). Les fréquences théoriques de toutes les notes jouées peuvent en être déduites grâce à la formule :

$$F_{note+1/2ton} = F_{note} * \sqrt[12]{2} \quad (\text{E.4})$$

Par exemple, en Sib,  $Si\#3 = Do4 = 440 * \sqrt[12]{2} = 466.16 \text{ Hz}$ .

Le tableau ci-dessous présente les doigtés et les fréquences théoriques pour chaque note appartenant à la tessiture de la trompette.

Pour chaque note et pour chaque position, la fréquence de la note, qui dépend donc de la longueur de piston ajoutée est calculée . De l'équation E.3, et de l'hypothèse 2 (H2), nous déduisons :

$$F_{calc} = \frac{F_{1n} \cdot L_1}{L_1 + \Delta L} \quad (\text{E.5})$$

avec  $\Delta L$  la somme des longueurs des pistons enfoncés.

Note	Doigté(s)	F en Hz	Note	Doigté(s)	F en Hz
Mi3	123	329.63	Sol#4	1,123	830.61
Fa3	13	349.23	La4	2,12	880
Fa#3	23	369.99	La#4	0,23	932.33
Sol3	12,3	392	Si4	123,3,12	987.77
Sol#3	1	415.3	Do5	1,13	1046.5
La3	2	440	Do#5	2,23	1108.73
La#3	0	466.16	Ré5	0,3,12,123	1174.66
Si3	123	493.88	Ré#5	1,13	1244.51
Do4	13	523.25	Mi5	2,23	1318.51
Do#4	23	554.37	Fa5	0,3,12,13	1396.91
Ré4	12,3	587.33	Fa#5	1,23,123	1479.98
Ré#4	1	622.25	Sol5	2,3,12	1567.98
Mi4	2,123	659.26	Sol#5	0,1	1661.22
Fa4	0,13	698.46	La5	2	1760
Fa#4	23	739.99	La#6	0	1864.66
Sol4	12,3	783.99			

Tableau E.1: Doigtés et fréquences des notes de la trompette en Sib

Par exemple, on a  $La\#3 = 466.16$  Hz avec  $L_{vide} = 141$ cm. Nous cherchons la fréquence du Fa3, joué en position 13. Nous avons donc :

$$F_{Fa3} = \frac{466.16 * 141}{141 + 17.27 + 26.67} = 355.4Hz \quad (E.6)$$

L'écart entre les fréquences théoriques et les fréquences calculées peut donc ensuite être calculé. Cela nous donne un écart en Hz noté  $\Delta_{Hz}$ . Ce  $\Delta_{Hz}$  est cependant limité puisqu'il dépend de l'endroit où l'on se situe dans la gamme. On comprend qu'une différence de 2 Hz entre 30 et 32 est beaucoup plus significative qu'entre 1500 et 1502 Hz. Nous décidons donc de calculer cet écart en cents, c'est-à-dire en centième de demi-ton, en utilisant la formule :

$$\Delta_{cents} = 1200. \frac{\ln(\frac{F_{th} + \Delta_{Hz}}{F_{th}})}{\ln(2)} \quad (E.7)$$

## Optimisation des longueurs

Le but de l'optimisation est double. Elle va nous permettre de trouver les combinaisons de longueurs de pistons :

- qui maximisent la justesse, c'est-à-dire qui minimisent les écarts avec les fréquences théoriques et les fréquences des notes jouées avec les doigtés usuels, indiqués dans le tableau E.1 ;

- qui minimisent les écarts entre les doigtés usuels et les doigtés factices.

Cela va nous permettre de voir si les deux évoluent dans le même sens et donc, si la justesse générale d'un instrument peut-être testée simplement sur les écarts de notes jouées en différentes positions.

Pour cela, on calcule deux sommes. La première est la somme des écarts en cents des doigtés usuels de toutes les notes jouables de la trompette aux notes théoriques. Cela représentera "l'éloignement" de la gamme tempérée donc, la justesse générale, notée  $\Delta J_g$ . La seconde est la somme des différences entre doigtés usuels et factices, notée  $\Delta J_f$ . Par exemple, Fa4 se joue avec les doigtés 1 ou 13. On prendra donc  $\Delta(Fa4) = \Delta(Fa4_1) - \Delta(Fa4_{13})$ .

On lance une exploration systématique en prenant comme intervalle de recherche :

- de 16.27 à 18.27 pour  $L_1$ ,
- de 7.38 à 9.38 pour  $L_2$ ,
- de 25.67 à 27.67 pour  $L_3$

par pas de 0.05 mm.

Après une exploration systématique de toutes les combinaisons possibles, le tableau suivant donne en haut les 5 combinaisons qui minimisent le plus  $\Delta J_g$ , et en-dessous les 5 combinaisons qui minimisent le plus  $\Delta J_f$  sachant que la valeur maximale de  $\Delta J_g$  est de 22.42 et celle de  $\Delta J_f$  de 34.16.

$L_1$	$L_2$	$L_3$	$\Delta J_g$	$\Delta J_f$
17.67	8.98	27.67	5.66	15.82
17.72	8.93	27.67	5.68	15.78
17.62	8.98	27.67	5.69	16.04
17.72	8.98	27.67	5.70	15.64
17.77	8.88	27.67	5.71	15.74
$L_1$	$L_2$	$L_3$	$\Delta J_g$	$\Delta J_f$
18.27	9.38	27.67	8.96	13.73
18.27	9.33	27.67	8.73	13.79
18.27	9.28	27.67	8.50	13.84
18.27	9.33	27.62	8.73	13.85
18.22	9.38	27.67	8.83	13.87

Tableau E.2: Résultats de l'optimisation de la longueur des pistons

Les valeurs trouvées sont assez proches, au vu de l'intervalle des solutions :

- $L_1$  varie entre 17.62 et 18.27 cm, donc  $\Delta_{L_1} = 0.65$  cm ;
- $L_2$  va de 8.88 à 9.38 cm, donc  $\Delta_{L_2} = 0.5$  cm ;
- $L_3$  va de 27.62 à 27.67 cm, donc  $\Delta_{L_3} = 0.05$  cm.

Les valeurs optimales des longueurs des pistons se situent donc dans ces intervalles.

Notre problème était de savoir s'il y a une relation entre le fait que les doigtés factices soient faux et le fait que la trompette en général soit fausse. Pour cela, nous avons calculé le coefficient de corrélation linéaire (Pearson) entre les valeurs des écarts  $\Delta J_g$  et  $\Delta J_f$  sur toutes les combinaisons calculées précédemment.

$$Pearson(\Delta J_g, \Delta J_f) = 0.91 \tag{E.8}$$

Ce résultat indique que les deux écarts de justesse (générale et doigtés factices) évoluent dans le même sens, et sont donc corrélés. Notre hypothèse, issue de la discussion avec les trompettistes, que la justesse générale est très liée à la justesse des doigtés factices semble donc vérifiée.



---

# F

# Projet ” Evaluation perceptive de sons de moteurs ”

## F.1 Introduction

Dans les années 1960 et 1970, l’industrie automobile fonctionnait sur un modèle de production de masse où prévalaient les performances et les capacités du produit à remplir sa fonction. Dans les années 1980, le marché est devenu plus concurrentiel, les arguments de vente étant alors centrés sur les notions de durabilité et de confort. Aujourd’hui, il se caractérise par un besoin accru de personnalisation des véhicules. Dans ce domaine, ainsi que pour de nombreux autres types de produits, la dimension sensorielle s’est donc ajoutée aux exigences de qualité, de confort et d’équipements. Avant d’acheter un véhicule, le consommateur l’appréhende par les sens. L’attraction visuelle de l’extérieur et de l’intérieur du véhicule ainsi que le toucher (poignées, commandes, volants) jouent un rôle essentiel. De même, d’un point de vue acoustique, le son de l’ouverture des portes et celui du moteur sont d’une importance capitale, non seulement dans le choix du client avant l’achat, mais aussi lors de l’utilisation du véhicule. Ce phénomène a poussé les fabricants à comprendre les phénomènes perceptifs entrant en jeu dans l’appréciation d’un produit par le consommateur, notamment au niveau psycho-acoustique, et à inclure cette analyse au stade de la recherche et du développement. L’analyse sensorielle, couramment appliquée à l’industrie agro-alimentaire, s’applique donc également à ce domaine.

## Description de l’étude

L’étude présentée dans ce document s’inscrit dans le cadre d’un projet entre le service Perception et Facteurs Humains de PSA Peugeot-Citroën, dont l’un des rôles est d’analyser les attentes du client en terme de confort visuel, acoustique et olfactif dans l’habitacle, et l’IRCCyN (Institut de Recherche en Communication et Cybernétique de Nantes). Ce



projet a consisté à appliquer à un panel de sujets dits naïfs deux types d'épreuves sensorielles pouvant servir à l'évaluation perceptive de sons de moteurs, afin qu'elles puissent être comparées par la suite à une méthode couramment appliquée chez PSA sur un panel d'experts (méthode du profil sensoriel).

Nous avons donc réalisé des tests perceptifs d'écoute de sons de moteurs automobiles afin d'en décrire l'espace perceptif. Nous avons également étudié les corrélations entre les données sensorielles et les métriques psycho-acoustiques des sons. Cette annexe présente une partie des résultats de l'étude complète réalisée dans le cadre du contrat, les données des tests réalisés par PSA restant confidentielles.

Nous présentons, dans un premier temps, l'étape de verbalisation, qui avait pour but de dégager une série de descripteurs, devant servir à l'évaluation des sons. Puis, la notation monadique sur ces descripteurs, consistant à faire évaluer ces sons par un panel de sujets naïfs. Enfin, nous avons étudié les corrélations de ces résultats avec quelques métriques psycho-acoustiques.

## F.2 Epreuve de verbalisation libre

### Déroulement

L'étape de verbalisation a consisté à générer du vocabulaire descriptif des sons à évaluer, ce vocabulaire devant être réduit à une liste de 15 descripteurs pour servir à la notation monadique monopolaire des sons.

Description de l'épreuve :

- Période : mi-mars 2005 ;
- 30 sujets (élèves ingénieurs 2e année) en 5 séances ;
- durée : 45 min.

Partie 1 : verbalisation individuelle

consignes : écouter les sons à l'aide de l'interface présentée ci-dessous (figure F.1) et noter le maximum de termes permettant de les caractériser (le document présenté en Document 1 a été remis aux sujets).

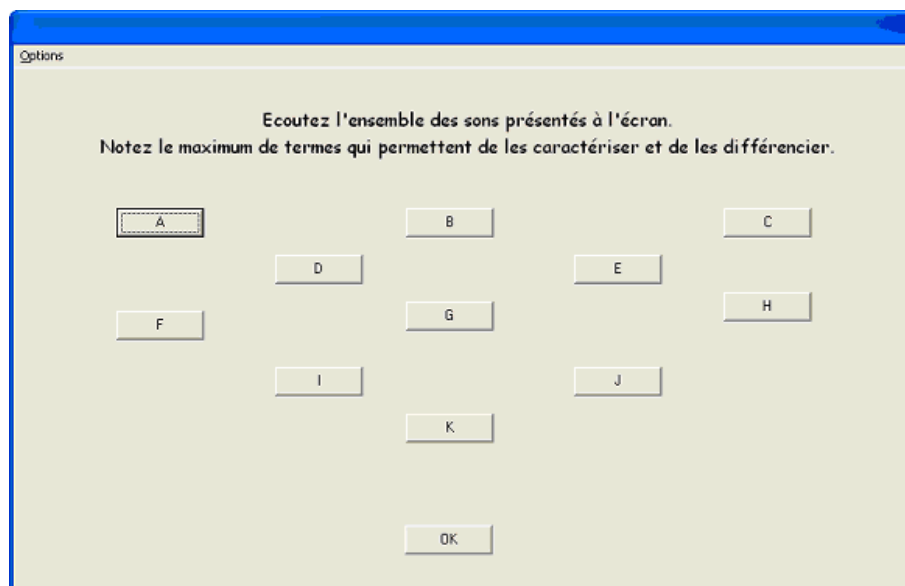


Figure F.1: Interface de l'épreuve de verbalisation libre

Partie 2 : synthèse collective

Les termes générés par les sujets ont été mis en commun lors d'une séance de groupe animée par l'expérimentateur, afin d'écarter les termes à caractère hédonique, de clarifier le sens des termes ambigus, de faire ressortir les principales dimensions caractéristiques des sons, et d'illustrer certains termes à l'aide d'exemples sonores. Les sujets ont eux mêmes générés des termes descriptifs génériques et regroupé les termes initiaux en sous ensembles.

## Résultats

Une fois le vocabulaire généré, une séance d'analyse des résultats a eu lieu afin de dégager une liste de 15 descripteurs (liste 1).

### Données brutes

L'épreuve de verbalisation a permis de générer une centaine de mots, qui ont été regroupés en 3 catégories : adjectifs, noms communs et images/évocations. L'ensemble des mots générés lors de l'épreuve de verbalisation libre, et le nombre de fois qu'ils sont apparus (occurrences), sont présentés en Document 2.

### Analyse

La démarche entreprise pour réduire la base de mots a consisté à regrouper les mots en sous-ensembles de termes synonymes (faisant référence au même attribut perçu). Le terme descriptif choisi pour désigner le sous-ensemble a le plus souvent été choisi par les sujets, ou suggéré par l'expérimentateur. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau F.1.

L'ensemble des mots présentés dans ce tableau représente environ 80% du vocabulaire généré lors de l'épreuve de verbalisation. Les 20% restants sont constitués de termes à caractère hédonique ou de termes dont le sens n'a pas été clarifié par les sujets. Ces derniers sont présentés dans le tableau F.2.

En faisant l'hypothèse que la constitution de groupes de synonymes est correcte, 15 termes ont donc été choisis pour décrire l'ensemble des dimensions perçues des sons. La liste de descripteurs présentée dans le tableau F.3 a été retenue.

Remarque : D'après les séances de synthèse collective, les mots " rassurant " et " pas rassurant " ont été employés pour faire référence à la notion de fiabilité du moteur. Le descripteur " Fiabilité perçue " leur a donc été associé.

Cette liste a permis de débiter l'épreuve de notation monadique monopolitaire des sons.

Terme descriptif du sous-ensemble	Occurrence du terme descriptif	Termes liés + Occurrence
grave	104	basses (5)
aigu	42	medium (7)
rapide/lent	44	
fort/faible	35	bruyant (4), discret (2), intense (2)
sourd	24	distinct (4), masqué (3)
souffle	22	ventilation (6), bruit de fond (2), bruit blanc (1)
puissant	20	pépère (1), paresseux (1), grosse machine (1), moteur puissant (1), sportive (1), petit moteur (6), 5/6 cyl. (1)
régulier/irrégulier	15	fluctuant (3), tic tac (2), horloge (1), minuterie (1)
doux	12	chaud (8), sec (10)
saccadé	11	continu (12), agressif (10), martelant (6), martèlement (1), haché (1), hargneux (1), marqué (1), tac tac tac (1), quelqu'un tape à la porte (1), marteau piqueur (4), claquements (5), fluide (3), lisse (1)
sifflement	10	strident (5)
rassurant pas rassurant	7	vieux (5), stressant (2), neuf (1), robuste (1), solide (1)
résonant	7	étouffé (11)
enveloppant	4	diffus (6), proche (2), envahissant (1), lointain (1)
parasites	3	cliquetis (10), vibrations (7), sale (1), frottement aigu (5), bruit (4), chocs métalliques (3), grésillement (3), chuintement (1), cliquettement (1), tintement (1), métallique (7), pur (1), bruit de pompe (1)

Tableau F.1: Résultats de la verbalisation libre (termes descriptifs)

Termes / occurrences
<p><b>Adjectifs :</b></p> <p>agréable (16), assourdissant (2), atténué (1), beau (1), calme (3), clair (14), classique (2), confus (1), couvert (1), creux (3), désagréable (16), détente (1), énergique (1), fatigant (2), fondu (3), froide (1), gras (3), homogène (3), intérieur (2), léger (8), lourd (8), mélodieux (3), feutré (3), métallique (7), net (2), neutre (4), pauvre (1), pénible (2), pesant (6), plein (1), poussif (4), profond (1), rauque (2), riche (4), rond (3), ronflant (7), ronronnant (8), serein (1), souple (1), sportif (2), tranquille (2), uniforme (1), vide (2), violent (1)</p> <p><b>Noms communs :</b></p> <p>pollution (1)</p> <p><b>Images/Evocations :</b></p> <p>Hélicoptère (3), bulles (2), compresseur à air (2), comme un ordinateur (1), maracas (1), sèche-cheveux (1), top top top (1), camion (2), utilitaire (2), camionnette (3), tracteur (8)</p>

Tableau F.2: Termes écartés pour la détermination des descripteurs

Descripteur	Termes associés
Graves	Grave
Aigus	Aigu
Rapidité	Rapide / Lent
Niveau Sonore	Fort / Faible
Sourd	Sourd
Souffle	Souffle
Puissance perçue	Puissant
Régulier	Régulier / Irrégulier
Doux	Doux
Saccadé	Saccadé
Sifflement	Sifflement
Fiabilité perçue	Rassurant / Pas rassurant
Résonant	Résonant
Enveloppant	Enveloppant
Parasites	Parasites

Tableau F.3: liste de descripteurs issus de la verbalisation libre (liste 1)

## F.3 Epreuve de notation monadique monopolaire (NM)

### Déroulement

Description de l'épreuve :

- période : début avril 2005 ;
- sujets : les mêmes que ceux ayant participé à l'épreuve de verbalisation ;
- consignes : noter les sons selon les descripteurs de la liste 1, sur une échelle non structurée.

Les bornes de l'échelle, et l'ordre d'apparition des descripteurs au cours de la notation sont présentés dans le tableau F.4. <sup>1</sup>

La notation a été réalisée en utilisant l'interface présentée Figure F.2.

Son principe de fonctionnement est le suivant : pour chaque descripteur, le sujet doit écouter le son en cliquant sur le bouton " Jouer le son XXX ", mettre une note allant de 0 à 10 sur l'échelle, et valider sa note en cliquant sur " OK ". Le son suivant est alors chargé et l'utilisateur doit recommencer la manipulation précédente. Quand les 11 sons ont été évalués, l'interface passe au descripteur suivant, selon l'ordre présenté plus haut.

Remarque : afin de s'affranchir de l'influence de l'ordre de présentation des sons sur les résultats, ainsi que du fait que l'utilisateur puisse les reconnaître si ils sont toujours codés par les mêmes identifiants au cours de la notation, les sons ont été codés par des nombres

<sup>1</sup>Nous avons opté pour cette orientation de l'échelle parce que l'échelle fréquentielle est orientée du grave à l'aigu de la gauche vers la droite

Borne inférieure	Descripteur	Borne supérieure
très présents[1]	Graves	très peu présents
très peu présent	Souffle	très présent
peu fort	Niveau sonore	fort
très peu présents	Aigus	très présents
Peu	Enveloppant	très
Peu	Régulier	très
Peu	Saccadé	très
Peu	Doux	très
Peu	Rapidité	très
Peu	Sourd	très
peu présent	Sifflement	très présent
très peu présents	Parasites	très présents
Peu	Résonant	très
Petite	Puissance perçue	très grande
Petite	Fiabilité perçue	grande

Tableau F.4: Ordre de présentation des descripteurs pour la notation monadique



Figure F.2: Interface de l'épreuve de notation monadique monopolaire (descripteur "graves")

différents d'un descripteur à l'autre, et présentés dans un ordre différent pour chaque descripteur. Ces nombres et leur ordre d'apparition ont été fournis par PSA. Cependant, l'ordre de présentation des sons n'a pas été changé d'un sujet à l'autre.

## Résultats

Une analyse de l'épreuve de notation monadique monopolaire a été effectuée pour réduire la liste 1 de descripteurs, afin de constituer la liste 2 utilisée pour l'épreuve de comparaison par paires.

### ANOVA à deux facteurs

Cette méthode consiste à savoir si la variabilité des notes obtenues par les sons peut-être expliquée par l'un ou l'autre des facteurs entrant en compte dans la notation : le facteur " son ", appelé également facteur produit, ou le facteur " sujet ". En d'autres termes, elle a pour but de déterminer si ce sont les différences entre les sons qui expliquent la variabilité des notes obtenues pour un descripteur donné (on parle alors d'effet produit), ou si ce sont les différences entre les sujets qui en sont la cause. Si il y a un effet produit, alors le descripteur peut-être considéré comme discriminant. Dans le cas contraire, il pourrait être rejeté. Le test statistique utilisé est le test de Fisher Snedecor. Les valeurs de F pour des seuils de 5% et de 1% sont :

$$\begin{aligned}
 F_{5\%(p-1;(s-1)(p-1))} &= F_{5\%(10;290)} = 1,86 \\
 F_{5\%(s-1;(s-1)(p-1))} &= F_{5\%(29;290)} = 1,50 \\
 F_{1\%(p-1;(s-1)(p-1))} &= F_{1\%(10;290)} = 2,38 \\
 F_{1\%(s-1;(s-1)(p-1))} &= F_{1\%(29;290)} = 1,77
 \end{aligned}
 \tag{F.1}$$

La statistique de Fisher F pour chaque descripteur est présentée dans le tableau F.5 et en Document 3 (résultats détaillés). On constate que pour tous les descripteurs, il y a un effet produit significatif au seuil de 1% et jamais d'effet sujet significatif au seuil de 5%. Les descripteurs choisis permettent bien aux sujets de différencier les sons.

### Test des différences significatives entre les paires de sons

L'effet produit étant globalement significatif, nous nous intéressons maintenant à la significativité des différences entre toutes les paires de sons. On se trouve dans le cas d'échantillons appariés (les mêmes sujets testent tous les produits que l'on compare). Pour chaque paire de sons, et chaque descripteur, on compare la valeur absolue de la différence des moyennes à la PPDS (plus petite différence significative)(test du t-corrige).

Descripteur	Effet « produit »		Effet « sujet »	
	Fobservé	p-value	Fobservé	p-value
Grave	43.8	< 0.01%	0.8	76.07%
Souffle	14	< 0.01%	0.3	99.99%
Niveau sonore	31.3	< 0.01%	0.7	87.6%
Aigu	17.5	< 0.01%	0.6	95.06%
Enveloppant	7.7	< 0.01%	0.8	76.07%
Régulier	4.7	< 0.01%	0.5	98.65%
Saccadé	10	< 0.01%	0.2	99.99%
Doux	17.5	< 0.01%	0.2	99.99%
Rapidité	19.1	< 0.01%	0.5	98.65%
Sourd	15.9	< 0.01%	0.3	99.99%
Sifflement	16.2	< 0.01%	0.5	98.65%
Parasite	5.6	< 0.01%	0.6	95.06%
Résonant	2.8	0.25%	0.2	99.99%
Puissance perçue	3.8	< 0.01%	0.4	99.79%
Fiabilité perçue	3.6	< 0.01%	0.2	99.99%

Tableau F.5: Significativité de l'effet produit et de l'effet sujet (analyse de la variance à 2 facteurs)

La plus petite différence significative est donnée par :

$$PPDS = t_{(p-1)(s-1); \frac{2\alpha}{p(p-1)}} \sqrt{\sigma^2 \cdot \frac{2}{s}} \quad (\text{F.2})$$

avec  $t_{(p-1)(s-1); \frac{2\alpha}{p(p-1)}}$  la variable de Student pour un niveau de probabilité de  $\frac{2\alpha}{p(p-1)}$  et  $(p-1)(s-1)$  degrés de liberté ( $p$  = nombre de produits,  $s$  de sujets).  $\sigma$  : variance résiduelle.

Si la valeur absolue de la différence des moyennes est supérieure à la PPDS, les deux sons sont significativement différenciés au seuil  $\alpha$ . Les tableaux-résultats sont donnés en Document 4 avec  $\alpha = 5\%$ . Le tableau F.6 représente, pour chaque descripteur, le nombre de paires significativement différenciées (classé par ordre décroissant).

On constate que les descripteurs " Graves ", " Niveau sonore ", " Doux ", " Rapidité ", " Aigu ", " Sourd " la différenciation entre les sons est la plus importante. En revanche, pour les descripteurs " régulier ", " puissance perçue ", " fiabilité perçue ", " résonnant " la différenciation entre les sons deux à deux est mauvaise (même si globalement il y a un effet produit avec l'analyse de la variance). Pour ces descripteurs, les sujets n'ont sans doute pas une idée très claire de ce qu'ils représentent et comment évaluer le descripteur (soit les sujets indiquent peu de différences entre les sons, soit ils ne sont pas d'accord entre eux).

Le tableau F.7 représente, pour chaque paire de sons, le nombre de descripteurs pour lesquels les deux sons ont été significativement différenciés.



Descripteur	Nombre de paires	Anova
	différenciées	Fobs
Graves	37	43.8
Niveau sonore	32	31.3
Doux	28	17.5
Rapidité	26	19.1
Aigus	23	17.5
Sourd	22	15.9
Souffle	21	14
Saccadé	18	10
Sifflement	18	16.2
Enveloppant	15	7.7
Parasites	8	5.6
Régulier	7	4.7
Puissance perçue	5	3.8
Fiabilité perçue	3	3.6
Résonant	0	2.8

Tableau F.6: Nombre de paires différenciées pour chaque descripteur

	Son 1	Son 2	Son 3	Son 4	Son 5	Son 6	Son 7	Son 8	Son 9	Son 10	Son 11
Son 1		4	7	8	5	5	6	4	4	9	3
Son 2			5	6	7	4	6	6	1	7	3
Son 3				4	8	3	1	3	5	1	3
Son 4					5	2	3	6	7	5	3
Son 5						5	6	7	4	9	4
Son 6							3	4	7	6	3
Son 7								3	4	4	2
Son 8									5	6	4
Son 9										10	2
Son 10											6

Tableau F.7: Nombre de descripteurs pour lesquels la paire de sons est différenciée

## Analyse du consensus entre les 30 sujets ” IRCCyN ”

### *ACP normée produit/sujet par descripteur*

Une ACP normée a été effectuée, pour chaque descripteur de la liste 1, sur la matrice dont les éléments  $x_{ij}$  sont les notes attribuées au son  $i$  par le sujet  $j$ . Le tableau F.8 représente le pourcentage d’inertie pris en compte par la 1<sup>re</sup> composante principale. Il est révélateur du degré de consensus entre les sujets. Aucun descripteur n’atteint un

<b>Descripteur</b>	<b>% d’inertie sur la 1<sup>re</sup> Composante principale</b>
Grave	63.1%
Souffle	40.6%
Niveau sonore	55.6%
Aigu	43.8%
Enveloppant	27.6%
Régulier	30.7%
Saccadé	37.9%
Doux	46.3%
Rapidité	47.5%
Sourd	47.4%
Sifflement	44.1%
Parasite	28.5%
Résonant	33.4%
Puissance perçue	25.5%
Fiabilité perçue	29.4%

Tableau F.8: Nombre de descripteurs pour lesquels la paire de sons est différenciée

pourcentage d’inertie suffisant pour rendre compte d’un véritable consensus entre sujets. Les pourcentages les plus grands (supérieur à 55%) sont obtenus pour les descripteurs ” grave ” et ” niveau sonore ”, mais le degré de consensus reste moyen. Pour les descripteurs ” enveloppant ”, ” parasite ”, ” puissance perçue ”, ” fiabilité perçue ”, ” régulier ”, le consensus est médiocre, voire mauvais (pourcentage d’inertie inférieur à 31%).

### *ACP non normée produit/sujet par descripteur*

Une ACP non normée a été effectuée sur la même matrice que précédemment. Cela permet de représenter les sujets dans le plan factoriel de l’ACP, et de visualiser l’accord entre eux. Les résultats sont présentés en Document 5. Cela conforte les résultats du paragraphe précédent. Les sujets sont globalement d’accord pour les descripteurs ” grave ” et ” niveau sonore ”. Pour les descripteurs ” résonant ” et ” puissance perçue ”, ” fiabilité perçue ”, l’accord entre les sujets est mauvais.

En conclusion, le consensus entre les sujets est globalement faible. Ce résultat n’est pas surprenant. Il est dû au fait que les sujets sont des naïfs n’ayant suivi qu’une seule séance d’évaluation.

### Etude des évaluations - ACP non normée sur les moyennes des notes

Une analyse en composantes principales a été effectuée sur la matrice dont chaque élément  $x_{ij}$  contient la moyenne des notes attribuées au son  $i$  par les 30 sujets, pour le descripteur  $j$ . Le but de cette dernière était de connaître l'influence de chaque descripteur sur le plan principal ainsi que sur chacun des axes. Les valeurs propres issues de cette analyse sont représentées tableau F.9.

Nombre d'axes	Valeur Propre	% valeur propre	% Cumulé
1	153.36	48.6	48.6
2	64.81	20.5	69.1
3	53.94	17.09	86.19
4	18.65	5.9	92.09
5	8.51	2.7	94.79
6	7.27	2.3	97.09
7	4.64	1.5	98.59
8	2.45	0.8	99.39
9	1.32	0.41	99.8
10	0.64	0.2	100

Tableau F.9: Tableau des valeurs propres de l'ACP non normée

Ces résultats montrent que le plan factoriel permet de représenter 69,1% de l'information, et qu'il faut 10 axes pour conserver l'intégralité de cette dernière. Par ailleurs, ils montrent qu'avec 4 axes le pourcentage d'inertie atteint 90%.

Les pourcentages de contribution des descripteurs sur les 4 premiers axes et sur le plan des deux premiers facteurs sont présentés dans le tableau F.10.

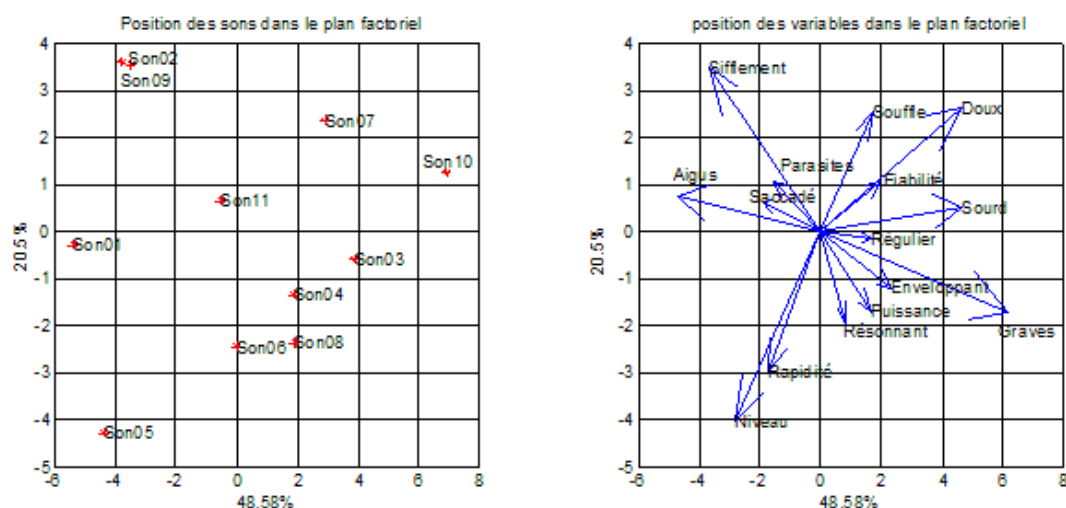


Figure F.3: Représentation des sons et des descripteurs dans le plan factoriel (F1-F2)

La représentation des sons et des variables dans le plan 3-4 est donnée en Document 6.

Descripteur	FobsNM (Anova)	%Cont1	%Cont2	%Cont3	%Cont4	% Plan
Grave	43.8	25	4.4	2.6	10.3	29.4
Souffle	14.03	2	9.9	26.9	15.2	11.9
Niveau	31.27	5	25.2	1.9	0.01	30.2
Aigu	17.5	14.5	0.9	2.4	5.7	15.4
enveloppant	7.67	3.6	2.13	6	0.07	5.73
Régulier	4.67	1.8	0.05	2.1	5.4	1.85
Saccadé	9.99	2.4	0.7	25.4	0.8	3.1
Doux	17.48	14.1	10.4	0.1	1.2	24.5
Rapidité	19.13	2	13.5	22.5	0.1	15.5
Sourd	15.93	14.2	0.4	3.5	28.7	14.6
Sifflement	16.18	9	18.7	1.4	14.7	27.7
Parasite	5.56	1.6	1.7	4.5	11.5	3.3
Résonant	2.78	0.5	5.8	0.3	0.06	6.3
Puissance	3.79	1.8	4.5	0.1	2.4	6.3
Fiabilité	3.59	2.6	1.7	0.01	1.9	4.3

Tableau F.10: résultats de l'ANOVA et de l'ACP

On peut noter :

- la prépondérance des descripteurs niveau - grave - doux - sifflement dans le plan factoriel(1,2) ;
- la prépondérance des descripteurs souffle - saccadé dans le plan factoriel(3, 4) ;
- les oppositions suivantes entre variables (doux opposé à niveau) - (aigu opposé à grave), (sourd opposé à aigu), (puissance opposée à sifflement), qui paraissent intuitivement cohérentes ;
- les corrélations suivantes entre variables (rapidité corrélé à niveau) - (doux corrélé à fiabilité), (doux corrélé à souffle), qui paraissent intuitivement cohérentes.

### Réduction de la liste 1 de 15 descripteurs

L'analyse des résultats précédents a permis de conserver ou d'éliminer certains descripteurs, suivant la valeur du  $F_{obs}$  issu de l'ANOVA, et leur contribution sur les dimensions de l'ACP : on choisit de rejeter les descripteurs peu discriminants ( $F_{obs}$  faible) et peu présents sur les premiers axes factoriels, ou alors les descripteurs synonymes (très corrélés ou très anti-corrélés). Cette analyse est synthétisée dans le tableau F.11.

Descripteur	Influence sur les résultats	Décision
Grave	très influent et permet de discriminer les sons	conservé
Souffle	important sur la 3e CP	conservé
Niveau	très influent et permet de discriminer les sons	conservé
Aigu	F relativement important et forte contribution sur la 1ere CP	conservé
Enveloppant	F faible et faible contribution sur les 4 premières CP	rejeté
Régulier	F faible mais influence sur la 4e CP	conservé
Saccadé	influence importante sur la 3e CP	conservé
Doux	F important et influence sur la 1ere CP	conservé
Rapidité	F important et influence sur les 2e et 3e CP	conservé
Sourd	malgré ses contributions, semble synonyme de grave et antonyme d'aigu	rejeté
Sifflement	F assez bon et influence moyennes sur les 4 CP	conservé
Parasite	F faible et très faible contribution dans le plan factoriel	rejeté
Résonant	F très faible	rejeté
Puissance	F faible	conservé
Fiabilité	F faible et pas de contribution notable sur les 4 axes	rejeté

Tableau F.11: Analyse des descripteurs de la liste 1

La liste de descripteurs ayant été retenue pour l'épreuve de comparaison par paires est donc la suivante (liste 2) :

- Grave
- Souffle
- Niveau sonore
- Régulier
- Aigu
- Saccadé
- Doux
- Rapidité
- Sifflement
- Puissance perçue.

## F.4 Métrique psychoacoustique des sons

### Métriques utilisées

Les métriques suivantes ont été calculées pour tous les sons (fournies par PSA - logiciel Artemis) :

- Niveau (dB SPL) ;
- Niveau (dBA SPL) ;
- Sonie (sone GF) ;
- Acuité (acum).

N.B : Ces données correspondent à la voie de droite des enregistrements. Les métriques psychoacoustiques des différents sons sont présentées dans le tableau F.12.

	Niveau (dB)	Niveau (dBA)	Sonie (sone)	Acuité (acum)
son1	65.72	52.72	8.36	2
son2	64.95	53.21	8.55	2.14
son3	64.65	51.81	8.02	1.85
son4	67.67	52.32	8.67	2.12
son5	65.01	53.83	9.18	1.94
son6	70.71	52.11	8.12	1.87
son7	66.49	49.99	7.12	1.84
son8	67.13	51.98	7.91	1.83
son9	65.69	51.12	7.79	1.99
son10	64.3	49.86	6.83	1.64
son11	67.48	51.69	8.11	2.04

Tableau F.12: Métriques psychoacoustiques des différents sons

### Projection des métriques en variables supplémentaires sur les différents plans sensoriels

#### Projection sur le plan " NM IRCCyN "

La sonie et le niveau dbA sont très corrélés avec le descripteur " niveau sonore ", l'acuité avec le descripteur " aigu ". Ces résultats sont tout à fait cohérents avec les résultats classiques de psychoacoustique. Signalons l'opposition " grave " " aigu ", tout à fait cohérente.

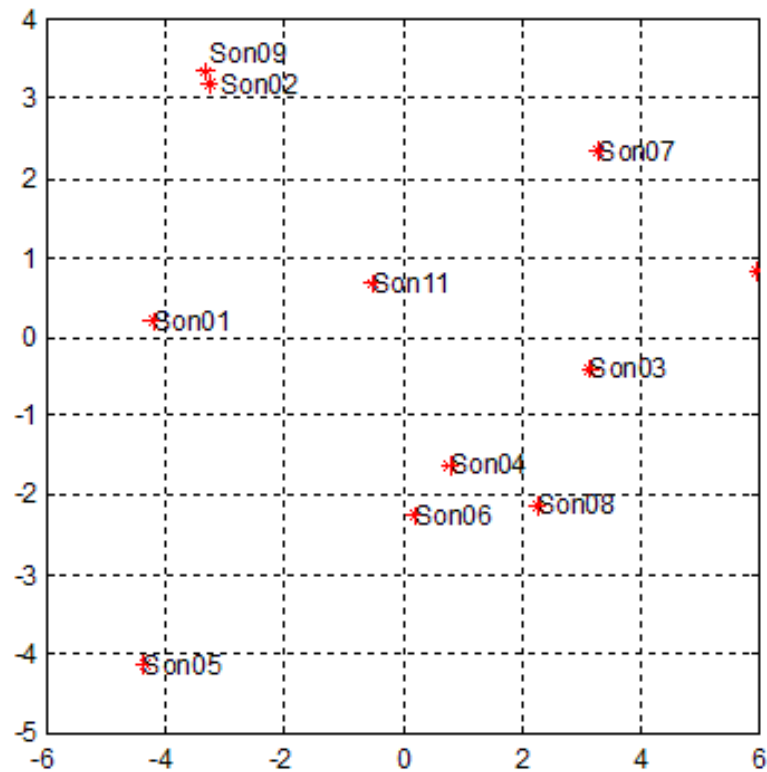
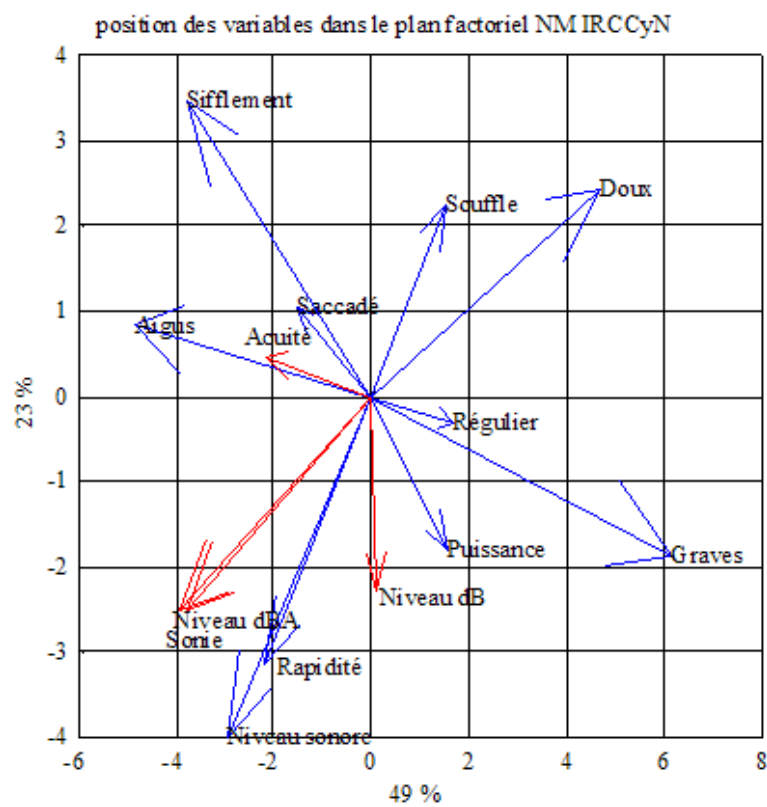
(a) *mds*(b) *acp*

Figure F.4: projection des métriques sur le plan de l'ACP " NM IRCCyN " (variable sup.)

## F.5 Conclusions

Au cours de cette étude, les sujets ont tout d'abord généré individuellement du vocabulaire, en écoutant les sons. Dans un second temps, ils ont, au cours d'une séance de groupe, tenté de trouver un consensus entre les termes générés. Cette étape de verbalisation a donc permis de générer une liste de 15 descripteurs.

La deuxième étape de ce projet a été de faire évaluer aux sujets les 11 sons de l'étude sur les 15 descripteurs générés, donc, de déterminer le profil sensoriel des sons de moteur. L'analyse des résultats de la notation monadique par une anova à 2 facteurs a montré qu'il y avait un effet produit pour tous les descripteurs au seuil de 1%, ce qui signifie que les sons sont bien différenciés sur les échelles proposées. Cependant, on note une grande différence par rapport à la statistique de Fisher, entre les descripteurs. Par exemple, le descripteur "graves" présente un effet produit beaucoup plus significatif que le descripteur "résonant" par exemple.

Ainsi, l'étape de notation monadique a permis également de repérer les descripteurs moins bien adaptés pour cette étude. Ces termes ont été retirés de la liste pour la suite de l'étude. Pour re-situer ce travail, signalons que le même genre d'étude a été mené par PSA sur un panel d'experts cette fois, dans le but de comparer les performances par rapport à la "qualité" du sujet (expert ou naïf). Des épreuves de comparaisons par paires ont également été mises en place pour alimenter ce débat.



**Document 1**

Feuille distribuée aux sujets pour l'épreuve de verbalisation libre

Nom :

Prénom :

<b>Son A</b>	
<b>Son B</b>	
<b>Son C</b>	
<b>Son D</b>	
<b>Son E</b>	
<b>Son F</b>	
<b>Son G</b>	
<b>Son H</b>	
<b>Son I</b>	
<b>Son J</b>	
<b>Son K</b>	

## Document 2

Vocabulaire issu de l'épreuve de verbalisation libre

### Catégorie 1 : Adjectifs

Adjectif	Occurrences	Adjectif	Occurrences	Adjectif	Occurrences
grave	104	rassurant	5	sportif	2
aigu	42	strident	5	stressant	2
lent	24	vieux	5	tranquille	2
sourd	24	bruyant	4	vide	2
fort	22	distinct	4	atténué	1
puissant	20	enveloppant	4	beau	1
rapide	20	neutre	4	blanc	1
agréable	16	poussif	4	confus	1
désagréable	16	riche	4	couvert	1
clair	14	calme	3	détente	1
faible	13	creux	3	énergique	1
continu	12	feutré	3	envahissant	1
doux	12	fluctuant	3	froide	1
étouffé	11	fluide	3	haché	1
saccadé	11	fondue	3	hargneux	1
agressif	10	gras	3	lisse	1
régulier	10	homogène	3	lointain	1
sec	10	masqué	3	marqué	1
chaud	8	mélodieux	3	neuf	1
léger	8	rond	3	paresseux	1
lourd	8	assourdissant	2	pauvre	1
ronronnant	8	classique	2	pépère	1
medium	7	discret	2	plein	1
métallique	7	fatigant	2	profond	1
résonnant	7	intense	2	pur	1
ronflant	7	intérieur	2	robuste	1
diffus	6	net	2	sale	1
martelant	6	pas rassurant	2	serein	1
pesant	6	pénible	2	solide	1
basses	5	proche	2	souple	1
irrégulier	5	rauque	2	uniforme	1
				violent	1

## Catégorie 2 : Noms

Nom	Occurrences
souffle	22
cliquetis	10
sifflement	10
vibrations	7
claquements	5
frottement aigu	5
bruit	4
chocs métalliques	3
grésillement	3
parasites	3
bruit de fond	2
chuintement	1
cliquettement	1
martellement	1
pollution	1
tintement	1

## Catégorie 3 : Images

Image	Occurrences
tracteur	8
petit moteur	6
ventilation	6
marteau-piqueur	4
camionnette	3
hélicoptère	3
bulles	2
camion	2
compresseur à air	2
tic tac	2
utilitaire	2
5 / 6 cyl	1
bruit de pompe	1
comme un ordinateur	1
grosse machine	1
horloge	1
maracas	1
minuterie	1
moteur puissant	1
sèche-cheveux	1
tac tac tac tac	1
top top top	1
voiture sportive	1

## Document 3

Résultats de l'ANOVA à deux facteurs sur les matrices produits/sujets de la notation monadique

### Descripteur "Graves"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	1403.6	10	140.4	43.8
Sujets	74	29	2.6	0.8
Résiduelle	929.4	290	3.2	
Totale	2512.5	329	7.6	

### Descripteur "Souffle"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	838.8	10	83.9	14
Sujets	44.9	29	1.5	0.3
Résiduelle	1734.2	290	6	
Totale	2810.4	329	8.5	

### Descripteur "Niveau sonore"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	777.4	10	77.7	31.3
Sujets	47.7	29	1.6	0.7
Résiduelle	721	290	2.5	
Totale	1656.7	329	5	

### Descripteur "Aigus"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	821.4	10	82.1	17.5
Sujets	85	29	2.9	0.6
Résiduelle	1360.9	290	4.7	
Totale	2399.8	329	7.3	

### Descripteur "Enveloppant"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	431.6	10	43.2	7.7
Sujets	125.6	29	4.3	0.8
Résiduelle	1632	290	5.6	
Totale	2261.9	329	6.9	

## Descripteur "Régulier"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	267	10	26.7	4.7
Sujets	85.4	29	2.9	0.5
Résiduelle	1657.7	290	5.7	
Totale	2164	329	6.6	

## Descripteur "Saccadé"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	577.9	10	57.8	10
Sujets	36.2	29	1.2	0.2
Résiduelle	1678	290	5.8	
Totale	2480.2	329	7.5	

## Descripteur "Doux"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	884.3	10	88.4	17.5
Sujets	31	29	1.1	0.2
Résiduelle	1467.4	290	5.1	
Totale	2516.6	329	7.6	

## Descripteur "Rapidité"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	751.5	10	75.2	19.1
Sujets	56.9	29	2	0.5
Résiduelle	1139.3	290	3.9	
Totale	2096.6	329	6.4	

## Descripteur "Sourd"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	905	10	90.5	15.9
Sujets	57.2	29	2	0.3
Résiduelle	1648.1	290	5.7	
Totale	2727.2	329	8.3	

## Descripteur "Sifflement"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	910.2	10	91	16.2
Sujets	88.4	29	3	0.5
Résiduelle	1631.2	290	5.6	
Totale	2920.9	329	8.9	

## Descripteur "Parasites"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	311.7	10	31.2	5.6
Sujets	97.3	29	3.4	0.6
Résiduelle	1627.4	290	5.6	
Totale	2389.8	329	7.3	

## Descripteur "Résonant"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	184.7	10	18.5	2.8
Sujets	41.6	29	1.4	0.2
Résiduelle	1924	290	6.6	
Totale	2327.4	329	7.1	

## Descripteur "Puissance perçue"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	201.8	10	20.2	3.8
Sujets	66	29	2.3	0.4
Résiduelle	1542.8	290	5.3	
Totale	1915.1	329	5.8	

## Descripteur "Fiabilité perçue"

Source de variation	Somme des carrés	D.L.	Carrés moyens	Fisher
Sons	202.2	10	20.2	3.6
Sujets	36.6	29	1.3	0.2
Résiduelle	1634.2	290	5.6	
Totale	1970.9	329	6	







## Descripteur "Saccadé"

[illegible]

## Descripteur "Doux"

[illegible]

## Descripteur "Rapidité"

[illegible]

[illegible][illegible][illegible]

## Descripteur "Résonant"

[illegible]

### Descripteur "Puissance perçue"

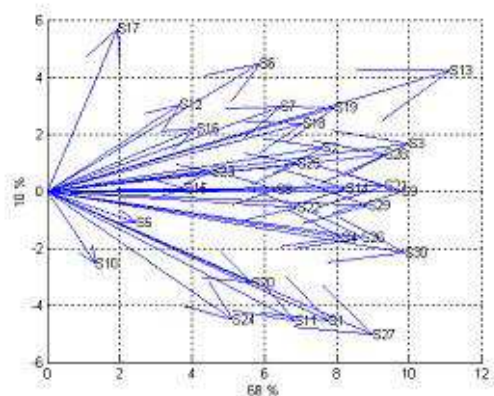
[illegible]

### Descripteur "Fiabilité perçue"

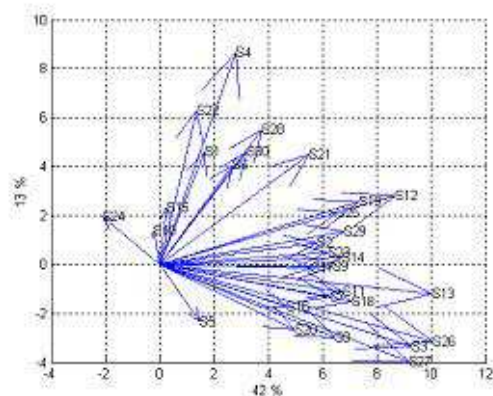
[illegible]

## Document 5

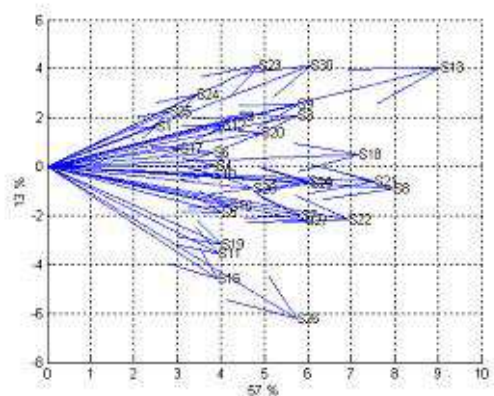
ACP produits/sujets par descripteur pour l'épreuve de notation monadique (NM- sujets IRCCyN) Représentation des sujets dans le plan factoriel



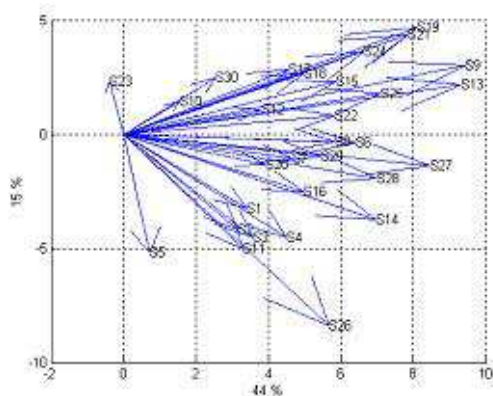
(a) *Graves*



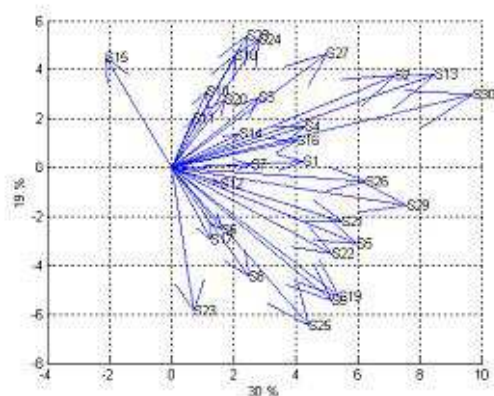
(b) *Souffle*



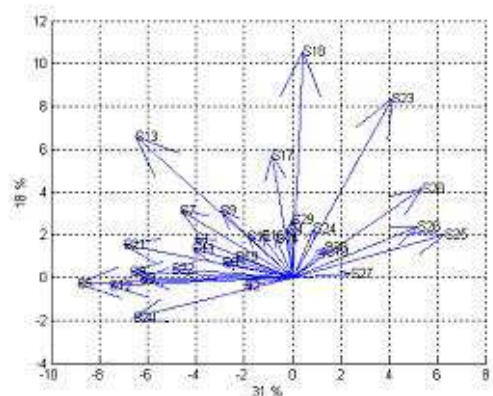
(c) *Niveau sonore*



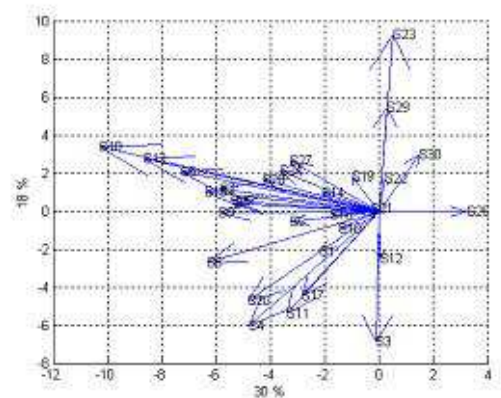
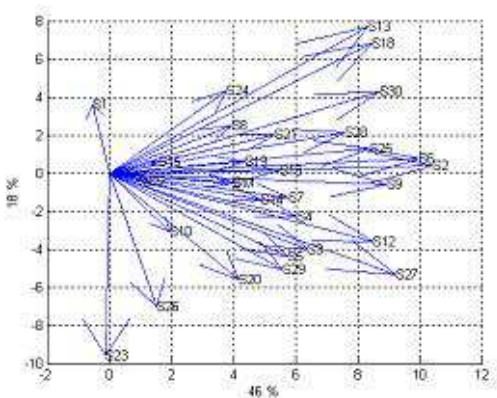
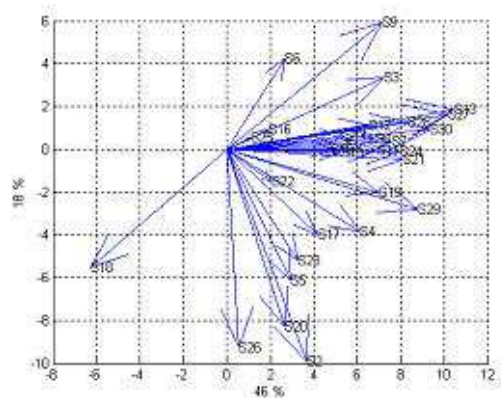
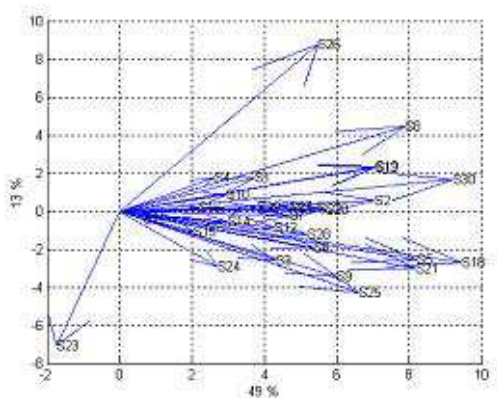
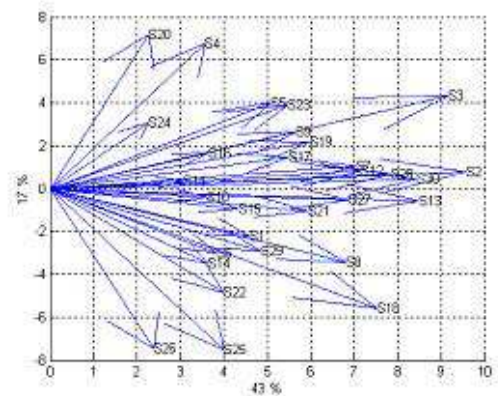
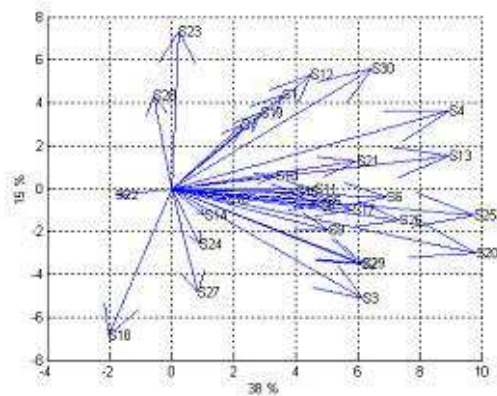
(d) *Aigus*

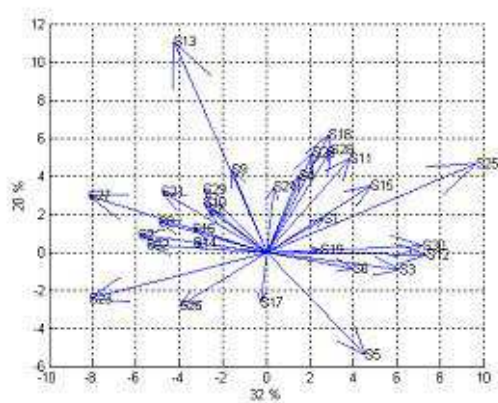
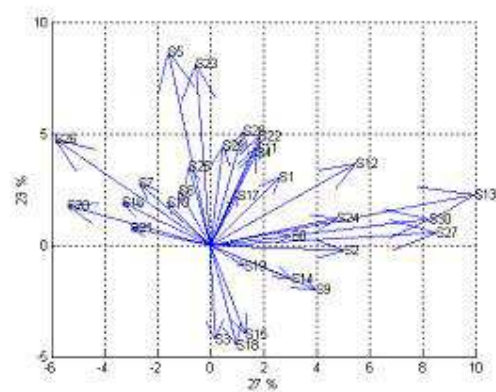
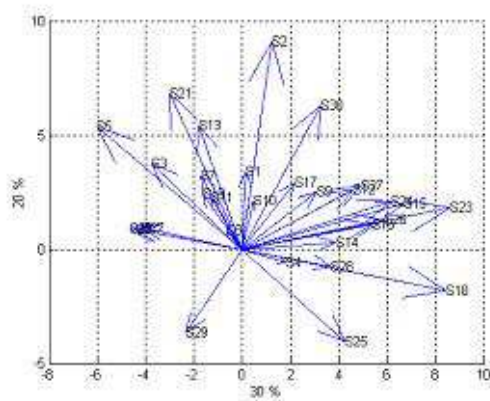


(e) *Enveloppant*



(f) *Régulier*



(m) *Résonant*(n) *Puissance perçue*(o) *Fiabilité perçue*

## Document 6

### Plan 3-4 de l'ACP non normée sur les notes moyennes

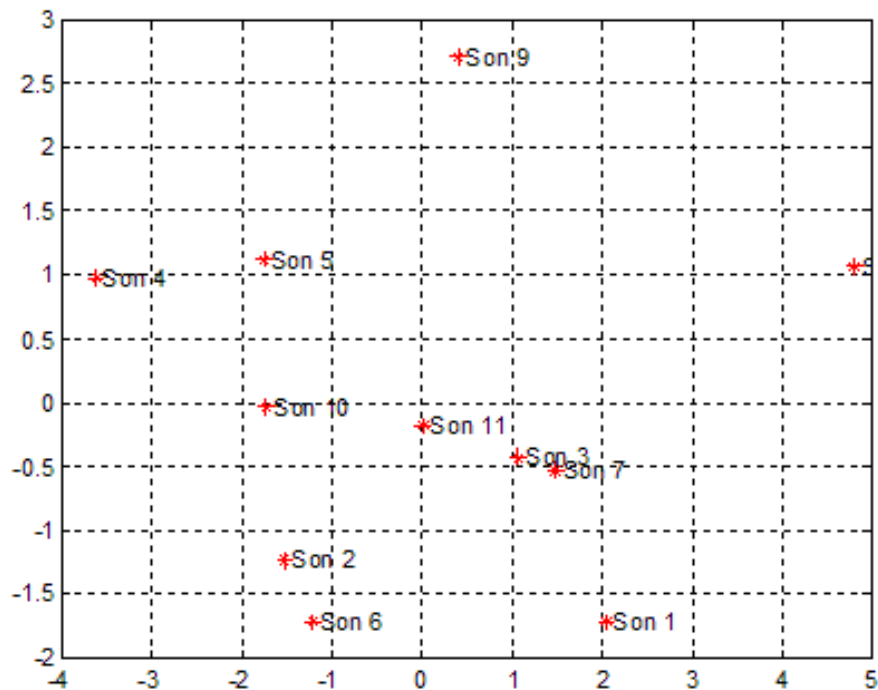


Figure F.5: Plan factoriel 3-4 des sons (ACP non normée)

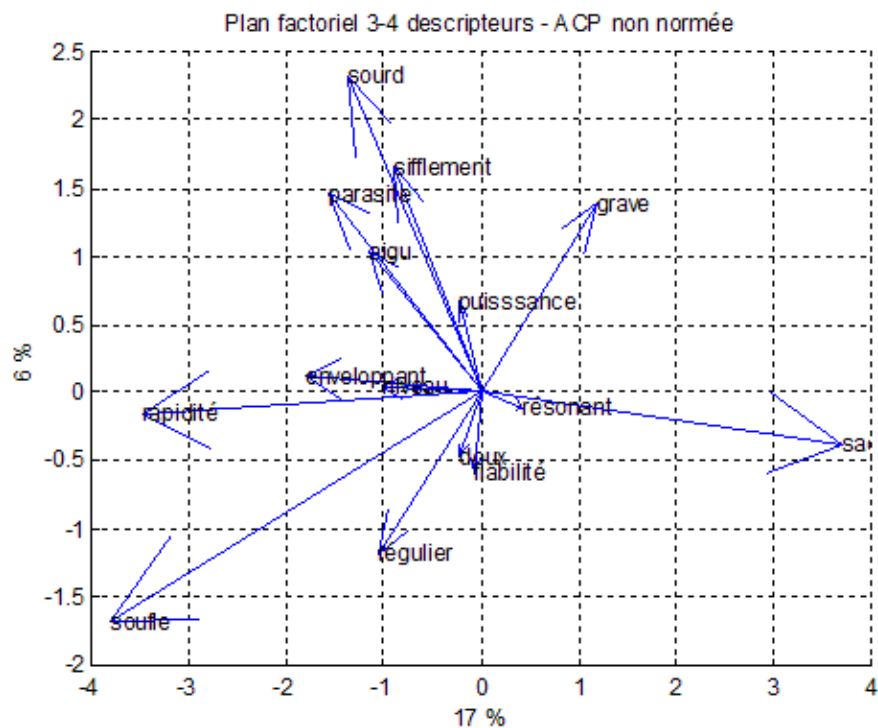


Figure F.6: Plan factoriel 3-4 descripteurs (ACP non normée)



## **Prise en compte des perceptions de l'utilisateur en conception de produit. Application aux instruments de musique de type cuivre.**

Aujourd'hui, la qualité perçue d'un produit arbitre de plus en plus le choix du consommateur. Au-delà des performances techniques, les perceptions du client deviennent très influentes dans la décision d'achat. Dans cette thèse, nous proposons une démarche de conception "orientée client", qui permet d'intégrer le consommateur dans les différentes étapes du processus de conception en prenant en compte ses besoins et ses préférences. Dans notre étude, nous appliquons cette démarche à la facture d'instruments de musique, produits pour lesquels les sensations de l'utilisateur sont primordiales et doivent être intégrées lors de la conception/amélioration d'un instrument. Pour étudier ces données perceptives, nous utilisons l'analyse sensorielle et montrons son intégration dans le processus de conception. Notre démarche consiste, dans un premier temps, à mener une étude perceptive sur une famille de trompettes en utilisant un panel d'experts et les outils de l'analyse sensorielle. Ensuite, nous réalisons une étude objective des instruments par la mesure physique d'une grandeur caractéristique : l'impédance d'entrée. Puis, nous utilisons l'analyse de données pour mettre en regard les évaluations perceptives et objectives, afin d'en déduire des règles utiles pour l'optimisation et la re-conception d'un instrument. Enfin, nous proposons d'intégrer des outils de réalité virtuelle dans le processus de conception centrée utilisateur. Ainsi, dans notre application, nous présentons les premières conclusions concernant les simulations sonores par modèle physique.

**Mots-clés :** Conception de produit centrée utilisateur, Analyse sensorielle, Acoustique musicale, Evaluation perceptive

## **Integration of user's perceptions in product design. Application to musical brass instruments.**

Today, the perceived quality of products arbitrates more and more the choice of the consumer. Beyond technical performances, the perceptions of the customer become very influent on the decision of purchase. In this thesis, we propose a "user-centered" design method, which allows the integration of the consumer in the different stages of the design process, by taking into account his/her needs and preferences. We apply this method to the design of musical instruments, products for which the feelings of the user are of prime importance, and must be integrated for the design/improvement of an instrument. To study these perceptive data, we use the sensory analysis and show its integration in the design process. Our method consists first in undertaking a perceptive study on a family of trumpets by using a panel of experts and sensory analysis tools. Then, we make an objective study of the instruments by the physical measurement of a specific characteristic of brasses: the acoustic input impedance. Then data analysis is used to correlate perceptive and objective evaluations, in order to deduce some rules, useful for the optimisation and the improvement of an instrument. Finally, we propose to integrate virtual reality tools in the user-centered design process. Thus, in our application, we report the first conclusions concerning physical modelling based sound simulations.

**Mots-clés :** User centered design, Sensorial analysis, Musical Acoustic, Perceptive evaluation